ÜBER DEN ELEKTRISCHEN WIDERSTAND DES KALKSPATS BEI WECHSELSTROM

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR

ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE

DER

HOHEN PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT
(II. SEKTION)

DER

KGL. BAYR. LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT
ZU MÜNCHEN

VORGELEGT AM 9. JULI 1912

VON

KAROL SZLENKER
AUS WARSCHAU.

LEIPZIG
JOHANN AMBROSIUS BARTH
1913

ÜBER DEN ELEKTRISCHEN WIDERSTAND DES KALKSPATS BEI WECHSELSTROM.

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR

ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE

DER

HOHEN PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT
(II. SEKTION)

DER

KGL. BAYR. LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT
ZU MÜNCHEN

VORGELEGT AM 9. JULI 1912

VON

KAROL SZLENKER
AUS WARSCHAU.

LEIPZIG
JOHANN AMBROSIUS BARTH
1913

Druck von Metzger & Wittig in Leipzig.

DEM ANDENKEN

MEINER GELIEBTEN ELTERN

GEWIDMET.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548312_0120

Inhaltsverzeichnis.

Seite

§ 1. Einleitung 7
§ 2. Methode 9
§ 3. Versuchsanordnung 17
§ 4. Fehlerquellen 24
§ 5. Versuchsgang 36
§ 6. Versuchsresultate 37
§ 7. Diskussion der Versuchsresultate 62
Zusammenfassung der Resultate 73

§ 1. Einleitung.

Die Dielektrizitätskonstante und Leitfähigkeit von Kalkspat wurde von Curie[1]) in den 80er Jahren des vorigen Jahrhunderts mit denjenigen einer ganzen Reihe von kristallinischen und amorphen Isolatoren untersucht.

Curie hat für verschiedene aber gleich orientierte Exemplare desselben Kristalles für die Dielektrizitätskonstante merklich dieselben, für die Leitfähigkeit aber sehr verschiedene Werte erhalten.

Sich auf diese Tatsache und eine weitere stützend, daß durch vorheriges Erwärmen und Trocknen die Leitfähigkeit in weiten Grenzen verändert wird, machte Curie auch für den Kalkspat die Annahme, daß seine Leitfähigkeit der Hauptsache nach dem in den häufig bei diesen Kristallen vorkommenden ultramikroskopisch kleinen Sprüngen eingeschlossenen Wasser und den darin gelösten Substanzen zuzuschreiben ist.

Nach Curie hätten wir also mit einem inhomogenen Dielektrikum zu tun.

Demgegenüber stand aber die von Rowland und Nichols[2]) festgestellte Tatsache, daß Kalkspat keinen Rückstand zeigt, was also, falls die Curiesche Annahme richtig wäre, der Maxwellschen Theorie des elektrischen Rückstandes widersprechen würde. Nahezu gleichzeitig mit Curie haben Warburg und Tegetmeier[3]) eine Reihe von Kristallen, vor allem Quarz, aber auch Kalkspat, auf ihre elektrische Leitfähigkeit bei hoher Temperatur untersucht, insbesondere beschäftigte sie die Frage der galvanischen Polarisation bei diesen Kristallen,

1) J. Curie, Ann. de chim. et phys. **17.** p. 385. 1889; **18.** p. 203. 1889.

2) Rowland u. Nichols, Phil. Mag. **11.** p. 414. 1881.

3) E. Warburg und F. Tegetmeier, Wied. Ann. **32.** p. 442. 1887; **35.** p. 462. 1888.

die sich in einer zeitlichen Abnahme des Stromes bei einer konstanten Potentialdifferenz äußert und die bei Glas schon von Buff[1]), Beetz[2]) und Warburg[3]) beobachtet wurde.

Warburg führt diese zeitliche Abnahme der Stromstärke zurück auf Bildung schlechtleitender Schichten in den Kristallen beim Stromdurchgang, deren Existenz zu beweisen ihm gelungen ist. — Neuerdings ist die Bildung dieser schlechtleitenden Schichten im Glase von Schulze[4]) eingehend untersucht und vom Standpunkte der Elektrolyse studiert worden.

Für Quarz gibt also Warburg den Charakter einer elektrolytischen Leitfähigkeit zu, weist aber die Annahme einer der bei flüssigen Elektrolyten beobachteten analogen galvanischen Polarisation zurück.

Die elektrische Leitfähigkeit von Quarz und den Einfluß einer Bestrahlung mit X-Strahlen auf dieselbe hat Joffe[5]) im Zusammenhange mit der elastischen Nachwirkung dieses Kristalles in provisorischer Weise untersucht und ist der Ansicht, daß wir es bei Quarz mit einer festen Lösung zu tun haben, die galvanische Polarisation von sehr viel größerem Betrage, als diejenige der flüssigen Elektrolyte, aufweist.

Es entstand nun die Frage, ob Kalkspat im Gegensatz zu der Curieschen Auffassung den Charakter eines festen Elektrolyten zeigt und ferner, ob eine galvanische Polarisation im gewöhnlichen Sinne bei ihm nachweisbar wäre. Diese Frage ist von Röntgen[6]) eingehend untersucht und beantwortet worden.

In seiner zum größten Teile in Gemeinschaft mit A. Joffe angestellten Untersuchung über die Leitung der Elektrizität im Kalkspat und über den Einfluß der X-Strahlen darauf stellte Röntgen u. a. fest, daß die Bewegung der Elektrizität in Kalkspat dem Ohmschen Gesetz folgt, und daß Kalkspat ein stark mit der Temperatur zunehmendes Leitungsvermögen besitzt, sowie Polarisation aufweist, welche Tausende von Volt erreichen kann.

---

1) H. Buff, Ann. Chem. und Pharm. **90.** p. 264. 1854.
2) W. Beetz, Pogg. Ann. **92.** p. 432. 1854.
3) E. Warburg, Wied. Ann. **21.** p. 622. 1884.
4) G. Schulze, Ann. d. Phys. **37.** p. 435. 1912.
5) A. Joffe, Diss. München 1905.
6) W. C. Röntgen, Sitzungsber. d. Münchn. Akad. **1.** p. 113. 1907.

Dank diesen Ergebnissen ist man berechtigt, den Kalkspat als festen Elektrolyten aufzufassen; es war also naheliegend, auf den Kalkspat diejenige Methode anzuwenden, die bei der Untersuchung des Leitvermögens und der galvanischen Polarisation der flüssigen Elektrolyte bahnbrechend war und zur Messung des Leitvermögens der Elektrolyte allgemein benutzt wird, nämlich die Wechselstrommethode; dies um so mehr, als schon Hanauer[1]) die Methode der Wheatstoneschen Brücke bei Wechselstrom mit Erfolg darauf angewendet hat, um die galvanische Polarisation bei flüssigen Dielektriken nachzuweisen.

Die Aufgabe, mit dieser Methode den Charakter der Elektrizitätsleitung in Kalkspat zu untersuchen, wurde mir von Seiner Exzellenz Hrn. Geheimrat Prof. Dr. W. C. Röntgen gestellt, dem ich für seine Anregung, seine fördernden Ratschläge und Unterstützungen bei der Ausführung der vorliegenden Arbeit meinen ehrerbietigsten Dank ausspreche.

§ 2. Die Methode.

1. Die Wahl der Methode und deren Begründung.

Im Prinzip wurde die Maxwellsche Methode der Wheatstoneschen Brücke für Wechselstrom zur Bestimmung von Kapazitäten gewählt.

Die engere Wahl zwischen deren verschiedenen Modifikationen wurde durch Vorversuche getroffen.

Die Max Wiensche „Serien-Widerstandsmethode", der sich sowohl Hanauer[2]) wie Bruno Monasch[3]) in ihren Arbeiten bedienten, wurde zunächst untersucht, und zwar an Vorversuchen mit Kondensatoren aus Salinglas. — Schon bei diesen Vorversuchen erwies sich die Methode für kleine Kapazitäten und hohe Widerstände (kleine Energieverluste in den Kondensatoren) als unempfindlich und ungenau.

Da nun der Beschaffung und Herstellung größerer Kalkspatplatten eine bestimmte Grenze gesetzt ist und man hierbei

1) J. Hanauer, Wied. Ann. 65. p. 789. 1898.
2) J. Hanauer, l. c.
3) B. Monasch, Danziger Diss. 1906.

trotz der hohen Dielektrizitätskonstante des Kalkspats mit Kapazitäten von der Größenordnung $0{,}1—0{,}3 \cdot 10^{-3}$ Mikrof. rechnen muß, so mußte von der Anwendung der „Serien-Widerstandsmethode“ für die Versuche an Kalkspat abgesehen werden.

Bei der „Serien-Widerstandsmethode“ wird bekanntlich der Energieverlust im Zweige 1 (Fig. 1) der Wheatstoneschen Brücke, den man sich zunächst schematisch als einen Ohmschen Widerstand w_1 zur Kapazität c_1 des untersuchten Kondensators parallel geschaltet zu denken hat, mit einem Widerstand w_2 im Zweige 2 kompensiert, der dem Meßkondensator c_2 vorgeschaltet wird.

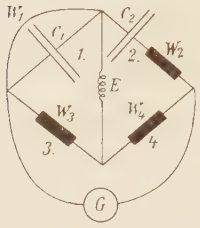

Fig. 1.

Die Zweige 3 und 4, von reinen Ohmschen Widerständen gebildet, die aus Rücksicht auf die Empfindlichkeit der Methode und noch viel mehr wegen einer weiter unten zu besprechenden Fehlerquelle (Ladungsströme) am zweckmäßigsten gleich groß, $w_3 = w_4$, gewählt werden. Unter diesen Bedingungen gelten die Formeln

$$n^2 c_1 c_2 w_1 w_2 = 1$$

und

$$c_2 w_2 = (c_2 - c_1) w_1,$$

aus denen man

$$c_2 = c_1 + \frac{1}{n^2 c_1 w_1^2} \quad \text{und} \quad w_2 = \frac{w_1}{1 + n^2 c_1^2 w_1^2}$$

als zusammengehörige Einstellungswerte erhält.

Nun war für die untersuchten Kalkspatplatten c_1 gleich ca. $2 \cdot 10^{-10}$ Farad und der Wert von w_1 schwankte zwischen 10^{10} und 10^7 Ω.

Bei den vorwiegend verwendeten Frequenzen $n/2\pi = 128$ und $n/2\pi = 256$ war $n^2 = 0{,}6 \cdot 10^6$ bzw. $2{,}6 \cdot 10^6$.

Hiernach berechnen sich für

		$w_1 = 10^{10}\ \Omega$	$10^9\ \Omega$	$10^7\ \Omega$
bei $\frac{n}{2\pi} = 128$	c_2	$2 \cdot 10^{-10}$ F.	$2 \cdot 10^{-10}$ F.	$3 \cdot 10^{-10}$ F.
	w_2	5000 Ω	50000 Ω	$5 \cdot 10^6$ Ω
bei $\frac{n}{2\pi} = 256$	c_2	$2 \cdot 10^{-10}$ F.	$2 \cdot 10^{-10}$ F.	$2{,}2 \cdot 10^{-10}$ F.
	w_2	1000 Ω	10000 Ω	10^6 Ω

Es zeigt also diese kleine Überschlagsrechnung, daß, falls die Serien-Widerstandsmethode auch für die Versuche mit den Kalkspatplatten angewendet werden sollte, sehr hohe Werte von w_2 erforderlich wären, um w_1 im ganzen untersuchten Bereiche messen zu können.

Die Anwendung aber solch hoher Widerstände, abgesehen von der Schwierigkeit, solche konstant genug herzustellen, zieht nach sich die Einführung zweier sehr bedeutenden Fehlerquellen; dies sind

1. die Kapazität der Widerstände, die nie ganz zu vermeiden ist und wegen der Kleinheit der untersuchten Kapazitäten sehr störend sein könnte;

2. die Störung der Symmetrie der ganzen Brückenanordnung in bezug auf deren elektrostatische Kapazität gegen die Erde, ein Umstand, der bei allen diesen Brückenmethoden zur Bestimmung der Kapazität, besonders aber bei Anwendung so kleiner Kapazitäten, wie hier der Fall war, sehr stark ins Gewicht fällt.

Es hat nun F. W. Grover[1]) die verschiedenen Brückenmethoden für Wechselstrom zur gleichzeitigen Messung von Kapazität und Energieverlust in Kondensatoren auf ihre Empfindlichkeit und Fehlerquellen untersucht und miteinander verglichen. — Im ganzen wurden vier Methoden untersucht, von denen eine, die sogenannte „Serien-Selbstinduktions-Methode", zuerst von Prof. Rosa angegeben worden ist.[2]) Diese letzte Methode zeichnet sich vor allem dadurch aus, daß bei derselben in den beiden Kondensatorzweigen die Einführung anderer Kapazitäten außer denjenigen der Kondensatoren selbst vermieden wird. Dem ist zu verdanken, daß die Methode für Messungen von kleinen Kapazitäten sich viel besser als die anderen, insbesondere die Wiensche Serien-Widerstandsmethode eignet. Grover hat diesen Umstand besonders hervorgehoben[3]) und hat es auch durch vergleichende Messungen an kleinen Kondensatoren von ein paar Tausendstel Mikrofarad gezeigt.[4])

1) F. W. Grover, Bulletin of Bur. of Stand. Vol. 3. No. 3. p. 371 1907.

2) F. W. Grover, l. c. p. 389.

3) F. W. Grover, p. 407.

4) F. W. Grover, p. 423 ff.

Grover hat weiter festgestellt, daß der Einfluß der elektrostatischen Kapazitäten der Brückenanordnung gegen die Erde desto erheblicher wird, je kleiner die zumessenden Kapazitäten an sich sind und empfiehlt daher für kleine Kapazitäten die Substitutionsmethode.

Da es sich nun in der vorliegenden Arbeit um Kapazitäten handelte, die mindestens fünfmal so klein waren wie die kleinsten von Grover gemessenen, so lag es auf der Hand, sich endgültig für die Rosasche Serien-Selbstinduktions-Methode mit Substitution zu entschließen.

2. Beschreibung der Methode. Formeln.

Seien die vier Zweige der Wheatstoneschen Brücke mit 1, 2, 3 und 4 bezeichnet.

Zweig 1 wird zunächst gebildet durch den zu messenden Kondensator (Kalkspatplatte). Der Widerstandsoperator dieses Zweiges wird vorerst schematisch dargestellt durch die Kapazität c_1 des zu messenden Kondensators mit einem zu ihr parallel geschalteten reinen Ohmschen Widerstand w_1.

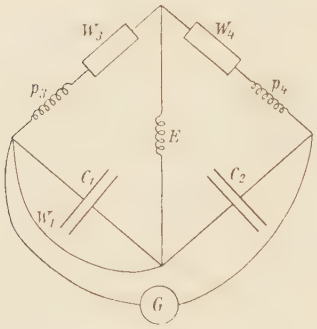

Fig. 2.

Im Zweige 2 befindet sich nur ein als verlustfrei angenommener Kondensator mit der Kapazität c_2.

Die Zweige 3 und 4 bestehen jeder aus einem Ohmschen Widerstand und einer Selbstinduktion in Reihe geschaltet. — Bei der Substitution wird im Zweige 1 der Versuchskondensator c_1 ersetzt durch einen variablen verlustfreien Meßkondensator mit der Kapazität c_1', und dementsprechend werden der Widerstand und Selbstinduktion des Zweiges 3 abgeändert, während die Zweige 2 und 4 unverändert bleiben.

Die Änderung des Ohmschen Widerstandes im Zweige 3 bezieht sich nur auf den Unterschied zwischen den Ohmschen Widerständen der Induktionsspulen, die im Zweige 3 vor und nach der Substitution benutzt werden; demnach ist diese Änderung im allgemeinen klein und in vielen Fällen zu vernachlässigen gegen den Gesamtwiderstand des Zweiges 3.

Die Wechselstromquelle E befinde sich zwischen Zweig 1 und 2, 3 und 4; das Nullinstrument (Vibrationsgalvanometer) G zwischen 1 und 3, und 2 und 4 (Fig. 2).

Seien p_3, w_3 und p_4, w_4 Selbstinduktion und Widerstand der Zweige 3 bzw. 4; p_3', w_3' diejenigen des Zweiges 3 nach der Substitution.

Ferner sei die Frequenz (Schwingungszahl in 2π sec) mit n bezeichnet.

Es werden dann die Operatoren der vier Zweige sein

$$a_1 = \frac{w_1}{1 + i n c_1 w_1} \quad \text{bzw.} \quad a_1' = \frac{1}{i n c_1'}$$

nach der Substitution;

$$a_2 = \frac{1}{i n c_2}; \quad a_3 = w_3 + i n p_3 \text{ bzw. } a_3' = w_3' + i n p_3'$$

nach der Substitution;

$$a_4 = w_4 + i n p_4.$$

Es ist vor der Substitution

$$\frac{a_1}{a_3} = \frac{a_2}{a_4};$$

nach der Substitution

$$\frac{a_1'}{a_3'} = \frac{a_2}{a_4};$$

also

$$\frac{a_1}{a_3} = \frac{a_1'}{a_3'} \quad \text{oder} \quad a_1 a_3' = a_1' a_3$$

oder

$$\frac{w_1}{1 + i n c_1 w_1}(w_3' + i n p_3') = \frac{1}{i n c_1'}(w_3 + i n p_3).$$

Hieraus ergeben sich

$$(1) \qquad c_1 = c_1' \frac{w_3 w_3' + n^2 p_3 p_3'}{w_3^2 + n^2 p_3^2},$$

$$(2) \qquad w_1 = \frac{w_3^2 + n^2 p_3^2}{n^2 c_1' (p_3 w_3' - p_3' w_3)}.$$

Für den Fall, daß $w_3' - w_3$ klein gegen w_3 ist, gelten die einfacheren Formeln

$$(3) \qquad c_1 = c_1' \frac{w_3^2 + n^2 p_3 p_3'}{w_3^2 + n^2 p_3^2},$$

$$(4) \qquad w_1 = \frac{w_3^2 + n^2 p_3^2}{n^2 c_1' w_3 (p_3 - p_3')}.$$

Ist schließlich $n^2 p_3^2 \ll w_3^2$ und destomehr dann $n^2 p_3 p_3' \ll w_3^2$, was für große w_1 der Fall ist, so haben wir die Näherungsformeln

$$c_1 = c_1' \tag{5}$$

$$w_1 = \frac{w_3}{n^2 c_1' (p_3 - p_3')}. \tag{6}$$

Entsprechend dem in der Einleitung über den vermutlichen Charakter der elektrischen Leitung im Kalkspat, den aufzuklären der Zweck vorliegender Arbeit war, Gesagten, muß auch in der mathematischen Darstellung dem Umstande Rechnung getragen werden, daß wir es im Falle von Kalkspat, abgesehen von einer dielektrischen Hysteresis, nicht mit einem reinen Ohmschen Widerstande zu tun haben, sondern ist entweder mit einem inhomogenen geschichteten Dielektrikum im Sinne Maxwells, oder mit einem elektrolytischen Widerstand mit Polarisation zu rechnen. — Im ersten Falle, wenn wir vereinfachend zwei Schichten im Dielektrikum, die eine gut, die andere schlecht leitend annehmen, haben wir die schematische Darstellung durch zwei hintereinander geschaltete Kapazitäten c_1 und C, von denen der ersteren ein reiner Ohmscher Widerstand w_1 parallel geschaltet ist.[1])

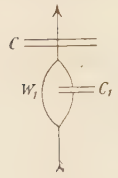

Fig. 3.

Im zweiten Falle kommen wir mit Max Wien[2]) zu derselben schematischen Darstellung, indem wir uns der Kapazität c_1 mit parallel geschaltenem Ohmschen Widerstand w_1 die „Polarisationskapazität“ C vorgeschaltet denken (Fig. 3).

Folglich kommen wir in beiden Fällen zum gleichen Widerstandsoperator für den Zweig 1, nämlich

$$a_1 = \frac{w_1}{1 + i n c_1 w_1} + \frac{1}{i n C},$$

der Unterschied ist nur der, daß im Falle 1 (geschichtetes Dielektrikum) C konstant, im Falle 2 (Polarisation) von Frequenz und Stromdichte abhängig sein kann.

Aus diesem erweiterten Ansatz sehen wir, daß wir es nicht wie oben mit zwei, sondern mit drei Unbekannten zu tun haben, nämlich mit c_1, w_1 und C; die Wechselstrommethode liefert uns aber nur zwei Gleichungen.

1) J. Hanauer, Wied. Ann. 65. p. 789. 1898.
2) Max Wien, Wied. Ann. 58. p. 37. 1896.

Um also über den Zusammenhang zwischen c_1, w_1 und C und namentlich über die Existenz und Charakter von C Aufschluß zu erhalten, müssen wir einen Umweg einschlagen.

Wir führen zwei Hilfsgrößen $c_{1\infty}$ und $w_{1\infty}$, die Kapazität und Widerstand des Kalkspats darstellen würden, wenn $C = \infty$ wäre (d. h. entweder im Falle 1 die schlechtleitende Schicht ∞ dünn und daher ohne Einfluß, oder im Falle 2 keine Polarisation vorhanden ist). Diese Größen $c_{1\infty}$ und $w_{1\infty}$ können direkt nach den oben abgeleiteten Formeln (1) bis (6) aus den Versuchsdaten berechnet werden. Kennt man andererseits den funktionalen Zusammenhang zwischen diesen Hilfsgrößen und den drei Unbekannten c_1, w_1 und C, so kann man aus einer etwaigen Abhängigkeit der Größen $c_{1\infty}$ und $w_{1\infty}$ von der Frequenz oder Stromstärke Schlüsse auf den Zusammenhang zwischen c_1, w_1 und C und deren Existenz ziehen.

Wir haben aber die beiden Operatoren

$$a_1 = \frac{w_1}{1 + i n c_1 w_1} + \frac{1}{i n C}$$

und

$$a_1 = \frac{w_{1\infty}}{1 + i n c_{1\infty} w_{1\infty}}.$$

Setzen wir die beiden einander gleich, so erhalten wir

$$\frac{w_1}{1 + i n c_1 w_1} + \frac{1}{i n C} = \frac{w_{1\infty}}{1 + i n c_{1\infty} w_{1\infty}},$$

$$i n C (1 + i n c_{1\infty} w_{1\infty}) w_1 + (1 + i n c_1 w_1)(1 + i n c_{1\infty} w_{1\infty})$$
$$= w_{1\infty}(1 + i n c_1 w_1) i n C,$$

$$i n C w_1 - n^2 C w_1 c_{1\infty} w_{1\infty} + 1 + i n (c_1 w_1 + c_{1\infty} w_{1\infty})$$
$$- n^2 c_1 w_1 c_{1\infty} w_{1\infty} = i n C w_{1\infty} - n^2 C c_1 w_1 w_{1\infty}.$$

Durch Trennung des reellen Teiles vom imaginären erhalten wir

(a) $$c_{1\infty} w_{1\infty} = C w_{1\infty} - C w_1 - c_1 w_1$$

und

(b) $$c_{1\infty} w_{1\infty} = \frac{1 + n^2 C c_1 w_1 w_{1\infty}}{n^2 (C w_1 + c_1 w_1)},$$

also

$$C w_{1\infty} - w_1 (C + c_1) = \frac{1 + n^2 C c_1 w_1 w_{1\infty}}{n^2 w_1 (C + c_1)},$$

$$n^2 C w_1 w_{1\infty} (C + c_1 - c_1) = 1 + n^2 w_1^2 (C + c_1)^2,$$

$$w_{1\infty} = \frac{1 + n^2 w_1^2 (C + c_1)^2}{n^2 C^2 w_1}.$$

Aus (a) haben wir

$$c_{1\infty} = C - \frac{w_1}{w_{1\infty}}(C + c_1),$$

hierin der Wert von $w_{1\infty}$ eingesetzt, erhalten wir

$$\begin{aligned} c_{1\infty} &= C - \frac{n^2 C^2 w_1^2 (C + c_1)}{1 + n^2 w_1^2 (C + c_1)^2} \\ &= \frac{C + n^2 w_1^2 (C + c_1)^2 C - n^2 w_1^2 (C + c_1) C^2}{1 + n^2 w_1^2 (C + c_1)^2} \\ &= \frac{C + n^2 w_1^2 C (C + c_1) c_1}{1 + n^2 w_1^2 (C + c_1)^2} \\ &= C \frac{c_1 + \dfrac{1}{n^2 w_1^2 (C + c_1)}}{1 + \dfrac{1}{n^2 w_1^2 (C + c_1)^2}} \cdot \frac{1}{C + c_1} \end{aligned}$$

oder schließlich erhalten wir

$$(7) \qquad c_{1\infty} = c_1 \frac{1}{1 + \dfrac{c_1}{C}} \cdot \frac{1 + \dfrac{1}{n^2 w_1^2 \left(1 + \dfrac{c_1}{C}\right) C \cdot c_1}}{1 + \dfrac{1}{n^2 w_1^2 \left(1 + \dfrac{c_1}{C}\right)^2 C^2}}$$

und

$$(8) \qquad w_{1\infty} = w_1 \left(1 + \frac{c_1}{C}\right)^2 + \frac{1}{n^2 C^2 w_1}.$$

Auf die allgemeinen Folgerungen, die man aus diesen Formeln ziehen kann, werden wir erst weiter unten bei der Diskussion der Versuchsresultate eingehen. Die beiden Formeln (7) und (8) könnten ebenso erhalten werden, indem bei der Herleitung der Formeln für die Serien-Selbstinduktionsmethode für den Zweig 1 der erweiterte Widerstandsoperator

$$a_1 = \frac{w_1}{1 + i n c_1 w_1} + \frac{1}{i n C}$$

benutzt worden wäre und also c_1 und w_1 als Funktionen von C und der Versuchskonstanten bestimmt sein würden.

Durch Elimination der Versuchskonstanten aus den Formeln (1) und (2) und den beiden neu gewonnenen würde man dieselben endgültigen Gleichungen (7) und (8) für $e_{1\infty}$ und $w_{1\infty}$ erhalten. Wir haben aber den allgemeineren Weg der

Ableitung vorgezogen, um damit zu gleicher Zeit zu zeigen, daß der funktionale Zusammenhang der Hilfsgrößen $c_{1\infty}$ und $w_{1\infty}$ mit den drei Unbekannten c_1, w_1 und C unabhängig von den Konstanten der gewählten Wechselstrombrückenmethode ist.

Es sei noch erwähnt, daß Nernst für den Fall eines elektrolytisch leitenden Dielektrikums mit Polarisation eine von der Max Wienschen abweichende schematische Darstellung benutzt. Er denkt sich die Polarisationskapazität C in Reihe mit dem Ohmschen Widerstand w_1 und beide zusammen parallel zur elektrostatischen Kapazität c_1 geschaltet. Max Wien[1]) hebt hervor, daß für seine Auffassung gegen die Nernstsche die Tatsache spricht, daß bei ihm der Leitungsstrom und der Verschiebungsstrom, den Maxwellschen Grundgleichungen entsprechend, gleichmäßig gegenüber der Polarisationskapazität behandelt werden. Für den Fall unendlich starker Polarisation, d. h. für $C = 0$, verschwindet bei Wien sowohl der Leitungsstrom, wie auch der Verschiebungsstrom, während bei Nernst dieser letzte bestehen bleibt, was unannehmbar ist.

Ferner zeigt es sich, daß die Formeln, die man aus der Nernstschen Annahme erhält, Spezialfälle der aus dem Wienschen Ansatz hergeleiteten sind für den Fall eines verschwindend kleinen Verhältnisses der elektrostatischen zur Polarisationskapazität.

§ 3. Die Ausführung der Methode und Versuchsanordnung. Apparate.

Zweig 1. Als Versuchskondensatoren im Zweige 1 der Wheatstoneschen Brücke wurden zwei Kalkspatplatten I und II benutzt, beide parallel zur optischen Achse geschnitten, also im Sinne der größten Leitfähigkeit und der größten Dielektrizitätskonstante orientiert.[2]) Bei den Vorversuchen mit Platte I war dieselbe mit Stanniol belegt. Da aber bei höheren Temperaturen sich zwischen Stanniolbelegung und Platte Blasen bildeten, die die Meß-

1) M. Wien, Wied. Ann. **58.** p. 37. 1896.

2) J. Curie, Ann. de chim. et phys. **17.** p. 385. 1889.

resultate verunstalteten, so mußte eine andere Art von Belegung benutzt werden. Es wurde Silberbelegung gewählt. Die Firma Dr. Steeg & Reuter in Homburg v. d. Höhe, von der beide Platten beschafft worden sind, hat in dankenswerter Weise die sehr schwierige beiderseitige Versilberung der Kalkspatplatten übernommen, welche besonders bei Platte II sehr befriedigend ausgefallen ist. Bei beiden Platten war beiderseits ein von der Versilberung freier, einige Millimeter breiter Rand gelassen, was unerläßlich war, um die äußere Leitfähigkeit möglichst unschädlich zu machen.

Die Kalkspatplatte I hatte eine unregelmäßige Gestalt, war 0,484 mm dick, und besaß 12,2 cm^2 wirksamen Flächeninhalt (Flächeninhalt der Silberbelegung). Kalkspatplatte II hatte die Gestalt eines nahezu quadratischen Rechtecks von $3{,}7 \times 3{,}4$ cm, war 0,640 mm dick. Der wirksame Flächeninhalt betrug 12,8 cm^2.

Die Art der Montierung der Platten innerhalb eines elektrischen Thermostaten war etwas abweichend.

Die Platte I wurde vertikal von zwei schmiegsamen Elektroden aus Platinblech, die noch mit dünner Platinfolie umwickelt waren, gehalten, welche ihrerseits an zwei Bernsteinzylindern befestigt waren, von denen nach oben die Zuleitungen aus Messingdraht ausgingen und durch zwei Bernsteinplatten durch die obere Wand des elektrischen Ofens führten. Die Bernsteinzylinder waren an ein Messingtischchen angeschraubt, welches auf drei Füßen stand, von denen zwei verstellbar waren. Zwischen den beiden Bernsteinzylindern befand sich noch ein dritter mit einer Rille, die die untere Kante der Platte I aufnahm. Das ganze Gestell stand auf drei Bleiplatten, von denen zwei an das Drahtnetz des elektrischen Ofens angelötet waren.

Da bei den Versuchen, namentlich mit der Platte II, es unerläßlich war, die Platte herauszunehmen und wieder einzumontieren, und bei der obigen Art der Montierung der Platte ein wenn auch geringes Verkratzen der Versilberung durch die Platinblechelektroden unvermeidlich war, so wurde das Gestell bei den Versuchen mit Platte II derart abgeändert, daß die Platinblechelektroden durch horizontale Messingpuffer ersetzt worden sind, von denen der eine federnd war und deren Endflächen gegeneinander genau parallel orientiert werden konnten.

Die Endflächen der Puffer waren durch aufgelötete Platinblechstücke gebildet, die an den Rändern abgerundet und glatt poliert waren; zur Sicherheit wurden über die Puffer Polschuhe aus Platinfolie geschoben. — Die federnde Kraft des einen Puffers war so bemessen, daß, wenn die Kalkspatplatte II zwischen die Puffer eingeklemmt war, sie auch von ihnen getragen wurde, so daß ein weiterer Stützpunkt überflüssig war, und der mittlere Bernsteinzylinder mit der Rille wurde nur für den Fall eines Herabgleitens der Platte als Notstütze gelassen.

Die Puffer waren durch vertikale Messingträger mit den zwei äußeren Bernsteinstücken verbunden. Die Zuleitungen, von den Puffern ausgehend, waren jetzt aus Kupferlitzen, die innerhalb des Ofenraumes mit vergoldeten federnden Klemmen endigten; die weiteren Zuleitungen bildeten vergoldete Messingdrähte, die durch zwei die Öffnungen der oberen Wand des elektrischen Ofens verschließende Bernsteinplatten durchgesteckt waren.

An diese Messingdrähte wurden im Ofen die Klemmen der Litzen befestigt. Auf diese Art war erreicht, daß das ganze Gestell bequem aus dem Ofen mitsamt der Kalkspatplatte herausgenommen werden konnte.

Der elektrische Ofen war ganz gegen außen verschlossen, um erstens eine intensivere Trocknung des Innenraumes zu ermöglichen, zweitens aber, um dessen Temperaturkonstanz störende Luftströmungen zu vermeiden. Obwohl es also bei der ganzen Anordnung angestrebt wurde, äußerst sparsam in der Verwendung von isolierenden Teilen zu sein, so mußten aus obigem Grunde die Zuleitungen von der Kalkspatplatte nach außen nicht frei durch die Luft, sondern durch die oben erwähnten Bernsteinplatten geführt werden.

Die kupfernen Wände und Türe des Ofens waren geerdet und bildeten einen elektrostatischen Schutz für den Kalkspatkondensator.

Die Temperatur im Innern des Ofens wurde an einem Thermometer abgelesen, welches durch eine der Bernsteinplatten hindurchging und dessen Quecksilbergefäß sich in einem Abstande von 3—4 cm von der Kalkspatplatte und in derselben Horizontalschicht wie diese befand. Wo es erforderlich war,

wurde der Einfluß des herausragenden Fadens auf die Temperaturablesung berücksichtigt.

Der Heizstrom wurde der Akkumulatorenbatterie des Institutes entnommen und an einem Millivolt- und Amperemeter von Siemens & Halske mit passendem Nebenschluß abgelesen. Er konnte mittels des im elektrischen Ofen eingebauten Kurbel- und eines Ruhstratwiderstandes reguliert werden. Es erwies sich von einem großen Vorteil, für den raschen Ausgleich der Temperaturänderungen im Ofen einerseits und im Zimmer andererseits einen Ventilator während der Versuche dauernd laufen zu lassen. Nur dank dieser Vorkehrung konnte es erreicht werden, daß das Thermometer im Ofen stundenlang keinen wesentlichen Temperaturgang anzeigte und die Schwankungen in der Ablesung der Temperatur höchstens ein zwanzigstel Grad betrugen. Natürlich war dann notwendig, daß auch die Temperatur des Zimmers möglichst konstant gehalten und oft kontrolliert wurde.

Als Trockenmittel im Innern des Ofens wurde bei einem Teile der Versuche mit Platte I dauernd Chlorcalcium, bei späteren Versuchen mit dieser Platte nur vorübergehend, während nicht geheizt wurde, konzentrierte Schwefelsäure, schließlich bei den Versuchen mit Platte II durchweg und dauernd, auch bei Temperaturen bis 150° Phosphorpentoxyd verwendet, welches sich auch am besten bewährt hat.

Bei der Substitution wurde im Zweige 1 die Kalkspatplatte ausgeschaltet und als Kapizität c_1' in diesen Zweig ein variabler Luftkondensator von Hans Boas in Berlin gebracht. Derselbe war mit Preßbernstein (Ambroid) isoliert und besteht bekanntlich aus zwei vertikalen koaxialen Halbzylindersystemen, die gegeneinander um ihre gemeinsame vertikale Achse drehbar sind.

Zur Ablesung diente eine kreisförmige, in hundert Teile geteilte Skala mit Nonius. Dieser Boassche Kondensator wurde von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt auf seine Isolation geprüft und an acht Punkten der Skala geeicht.

Die minimale Kapazität (Teilstrich 4) betrug nach dieser Eichung $0{,}0174 \cdot 10^{-3}$ MF.; die maximale (Teilstrich 99) $1{,}141 \cdot 10^{-3}$ MF.

Die bei den Versuchen gewonnenen Skaleneinstellungen

wurden nach der Eichungstabelle mittels Interpolation ausgewertet.

Der Kondensator war von einer geerdeten Metallhülle umgeben.

Zweig 2. Zweig 2 bestand in einem Gerdienschen variablen Luftkondensator, dessen beide Zylindersysteme gegeneinander und von der Erde durch Bernstein isoliert waren und dessen Gehäuse ebenfalls geerdet war. Der Kondensator war mit einer Natriumtrocknung versehen.

Zweige 3 und 4. In den Zweigen 3 und 4 befand sich je ein von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt geeichter Präzisions-Widerstandskasten von O. Wolff mit je 18 Widerständen von 0,1—1000 Ohm und 2000 Ohm Gesamtwiderstand. Im Zweig 3 war mit dem Rheostaten ein M. Wienscher Selbstinduktionsvariator[1]) in Reihe geschaltet. Der Apparat, im Jahre 1899 von Siedentopf in Würzburg gebaut, besitzt eine Kreisteilung von 10°—165° und wurde im Sommer 1909 im ganzen Meßbereich von 5° zu 5° geeicht. Zu diesem Zwecke wurde der Variator nach der üblichen Maxwellschen Wechselstrommethode in der Wheatstoneschen Brücke mit drei Selbstinduktionsnormalen verglichen, wozu als Nullinstrument das Vibrationsgalvanometer diente. Von den drei Selbstinduktionsnormalen, die die Sollwerte 1, 10 und 100 Millihenry hatten, wurde die mittlere nach der Wienschen Methode absolut bestimmt. Ihr Wert wurde zu 10,00 Millihenry bis auf 1 Promille gemessen. Die beiden anderen Normalen wurden in der Wheatstoneschen Brücke mit der absolut bestimmten wiederholt verglichen und ihre Werte ergaben sich zu $1{,}000_4$ Millihenry und 99,87 Millihenry.

Im Sommer 1911 wurde der Selbstinduktionsvariator abermals einer Kontrolleichung von 10° zu 10° und teilweise von 20° zu 20° unterworfen. Die größte durch die beiden Eichungen festgestellte Änderung war nur bei der Schaltung mit den kleinsten Werten zu 4 Promille maximal bestimmt, bei den übrigen neun Schaltungen des Variators war die größte vorkommende Abweichung 1 Promille. Die Einstellungsgenauigkeit der Eichungen bewegte sich zwischen 0,2 und 0,02 Promille.

1) M. Wien, Wied. Ann. 57. p. 249. 1896.

Die Selbstinduktion der Zuleitungen wurde berücksichtigt. Die Eichungsresultate wurden in Tabellen mit Werten von 5^0 zu 5^0 für alle zehn Schaltungen des Variators zusammengestellt, und nach diesen Tabellen wurden die bei den Versuchen gewonnenen Einstellungen am Variator durch Interpolation ausgewertet. Der Ohmsche Widerstand der 10 Spulenschaltungen des Variators wurde ebenfalls wiederholt mit Gleichstrom bestimmt bis auf rund 0,01 Ohm genau, und, da die Spulen mit Kupferdraht gewunden sind, wurde bei diesen Widerstandsbestimmungen und bei den Versuchen die Zimmertemperatur beobachtet und Temperaturkoeffizient nötigenfalls in Rechnung gezogen.

Im Zweige 4 war mit dem Rheostaten eine der beiden Selbstinduktionsnormalen 1 oder 10 Millihenry in Reihe geschaltet. Der Symmetrie halber wurde der Hauptzweig der Brückenanordnung zwischen die Zweige 3 und 4 einerseits und 1 und 2 andererseits gelegt.

Um das Potential in den Zweigen 3 und 4 wegen einer weiter unten zu besprechenden Fehlerquelle möglichst niedrig zu halten, wurde nach Br. Monasch [1]) der Punkt zwischen diesen Zweigen, d. h. der Verzweigungspunkt zwischen den beiden Rheostaten dauernd geerdet. In dem Hauptzweig befand sich die sekundäre Wickelung eines Ringtransformators, in dessen Primärkreis sich eine Akkumulatorenbatterie, ein kleiner induktionsloser Ruhstratwiderstand, die Unterbrechungsstelle des Saitenunterbrechers und ein Stromschlüssel in Reihe geschaltet befanden.

Im Brückenzweige befand sich das Nullinstrument, ein M. Wiensches Vibrationsgalvanometer mit einem mit Paraffin und Bernstein isolierten Stromschlüssel, der nach der Art des Rutherfordschen Elektrometerschlüssels konstruiert war und den Strom im Brückenzweige vom Fernrohr aus, welches sich in einem Abstande von 1,8 m vom Vibrationsgalvanometer befand, zu öffnen und schließen gestattete.

Das Vibrationsgalvanometer war an einer Wand des Beobachtungsraumes aufgestellt, an der ihr gegenüberliegenden war der Transformator mit seinem Primärkreis untergebracht.

1) Br. Monasch, l. c.

— Die Zweige 1, 2, 3 und 4 der Brückenanordnung befanden sich in der Mitte zwischen den beiden Wänden. Eine direkte Übertragung von elektromagnetischen Einflüssen auf das Nullinstrument war dadurch vermieden, was wiederholt kontrolliert wurde.

Die benutzten Magnetsysteme des Vibrationsgalvanometers wurden alle paar Wochen frisch magnetisiert, was sich von großem Wert erwies, da eine verhältnismäßig kleine Verringerung der Empfindlichkeit stark die Genauigkeit der Beobachtungen beeinträchtigte.

Zur möglichst weitgehenden Ausnützung der Empfindlichkeit des Instrumentes wurden bei der Einstimmung auf Resonanz derjenige Polabstand des Vibrationsgalvanometers und wirksame Saitenlänge desselben aufgesucht, bei denen die Amplitude der Schwingungen die größte war. Je größer die Amplitude, desto enger war, infolge der geringen Dämpfung, das Resonanzgebiet. Der damit verbundene sehr steile Verlauf der Resonanzzacke erforderte einen Saitenunterbrecher mit möglichst vollkommener Konstanz der Schwingungszahl. Dieser Bedingung genügte in sehr vollkommener Weise ein in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt unter der gütigen Kontrolle des Herrn Prof. Dr. Orlich konstruierter Saitenunterbrecher, der von einem Akkumulator betrieben war.

Parallel zu den beiden Unterbrechungsstellen desselben war je ein Kondensator von 2 MF. geschaltet. Für den gleichmäßigen Gang des Unterbrechers war es von Wichtigkeit, daß das Quecksilber möglichst oft erneuert und die Quecksilberoberfläche an der Unterbrechungsstelle des Betriebsstromes mit Alkohol bedeckt wurde. Für die zweite Unterbrechungsstelle, die sich im Primärkreis des Transformators befand, erwies sich eine Bedeckung des Quecksilbers mit Alkohol von Nachteil, da sie Schwankungen der Effektivspannung des Sekundärkreises begünstigte. Ferner war es notwendig, die feinen Platindrahtspitzen an der Unterbrechersaite, die in das Quecksilber tauchten, öfters zu erneuern.

Da sowohl der Saitenunterbrecher, wie auch das Vibrationsgalvanometer auf Temperaturschwankungen sehr empfindlich war, so erwies sich auch in dieser Hinsicht die Konstanz der Zimmertemperatur und das dauernde Ventilieren während der

Versuche von großer Nützlichkeit. Die Schwingungszahl des Saitenunterbrechers und hiermit die Frequenz, wurden mittels Schwebungen gegen eine Königsche Normalstimmgabel bestimmt. So konnte die Frequenz bis auf ein paar Zehntel Promille bestimmt und konstant gehalten werden. Zur Messung des Effektivwertes der Spannung im Sekundärkreise diente zuerst ein Cremer-Edelmannsches Saiten-, dann ein Hankelsches Goldblattelektrometer in Doppelschaltung, welche mittels der Normalbatterie des Institutes von 10—70 Volt geeicht und wiederholt kontrolliert wurden.

Das Hankelsche Elektrometer erwies sich als günstiger, da seine Ausschläge sehr genau dem Quadrate der Spannung im ganzen Meßbereich proportional waren, während bei dem Saitenunterbrecher dies nur im Bereich von 10 bis etwa 35 Volt der Fall war; auch besaß das Hankelsche Instrument eine größere Trägheit, so daß seine Einstellungen auch bei niedriger Frequenz vollkommen scharf blieben.

Die Saite des Saitenelektrometers bzw. das Goldblatt des Hankelschen war mit einer der isolierten Polplatten des Elektrometers verbunden und konnte entweder geerdet oder an den Verzweigungspunkt der Zweige 1 und 2 gelegt werden, während die andere Polplatte mit dem Gehäuse geerdet war.

Die Zuleitungen zwischen Transformator und der Brückenanordnung einerseits, und dieser und dem Vibrationsgalvanometer andererseits, wurden durch frei durch die Luft geführte Kupferdrähte hergestellt. An den unvermeidlichen Befestigungsstellen waren die Kupferdrähte mit Paraffin isoliert.

Zur Vermeidung von störenden Nebenschlüssen waren alle nicht direkt geerdeten Apparate und Apparatteile, auch die im Primärkreise, von der Erde hauptsächlich durch Paraffin, teilweise durch Bernstein und Hartgummi isoliert.

§ 4. Fehlerquellen.

1. Ladungsströme in der Brücke.

Es mag zunächst diejenige Fehlerquelle beschrieben werden, deren Einfluß auf die Versuchsresultate bei weitem der größte sein könnte und dessen Untersuchung und möglichst weit-

gehende Verringerung die Hauptschwierigkeit vorliegender Arbeit war und am meisten Zeit erforderte.

Es ist dies dieselbe Fehlerquelle, die schon sowohl Monasch[1]) wie Grover[2]) erkannt und beschrieben haben, und die von Ladungsströmen, die im Brückenzweige fließen, herrührt. Der Einfluß aber dieser Fehlerquelle war in unserem Falle, wegen der viel kleineren Kapazitäten, ein sehr viel stärkerer, so daß die von den beiden oben zitierten Beobachtern angewandten Vorkehrungen zwar den Einfluß herabminderten, denselben aber ganz unschädlich zu machen nicht vermochten.

Nach Monasch[3]) wird die Amplitude des Ladungsstromes im Brückenzweige, wenn dessen Kapazität c ist und derselbe sich auf dem Potential von der Amplitude V befindet, gleich $n c V$ sein. V wird seinerseits von der Spannung im Hauptzweige, vom Potentialabfall sowohl in den Zweigen 1 und 2 wie 3 und 4, endlich den Ladungsströmen zwischen verschiedenen Teilen der Brückenanordnung und der Erde abhängig sein.

Den störenden Einfluß dieser letzten zu eliminieren, war der Zweck der Substitution, was aber nie vollkommen erreicht werden konnte, da die Kapazität gegen die Erde des Versuchskondensators nicht gleich derjenigen des Substitutionskondensators war.

Um das Potential V möglichst niedrig zu halten, wurde der Punkt der Brücke zwischen den Zweigen 3 und 4 geerdet. War dies nicht der Fall, so war, abgesehen von der starken Änderung der Einstellungswerte von c_2 und p_3, bei offener Brücke stets ein deutlicher Ausschlag im Vibrationsgalvanometer zu beobachten, der desto größer war, je höher die Betriebsspannung und je größer die Widerstände w_3 und w_4 waren.

Aber auch wenn der Punkt zwischen den Zweigen 3 und 4 geerdet und das Verhältnis der Widerstände $w_3 = w_4$ zu den scheinbaren Widerständen in den Zweigen 1 und 2 schon erheblich kleiner war als der von Monasch angegebene Grenzwert, nämlich höchstens $^1/_{1000}$ statt $^1/_{500}$, war, wie es sich an den Vorversuchen und später an Kontrollversuchen zeigte, der Einfluß sehr beträchtlich.

1) Br. Monasch, l. c. p. 16.
2) F. W. Grover, l. c.
3) Br. Monasch, l. c. p. 17.

Dieser Einfluß war bei Messungen bei Zimmertemperatur und überhaupt dort, wo zwischen den Zweigen 1 und 2, und zwischen 3 und 4 keine wesentliche Unsymmetrie herrschte, nicht zu merken. Er wurde aber sofort bemerkbar, wenn diese Unsymmetrie größer wurde, d. h. wenn im Zweige 1 der Widerstand w_1 kleinere Werte annahm und gleichzeitig, um diesen zu kompensieren, im Zweige 3 die Selbstinduktion vergrößert wurde.

Dieser Einfluß der Ladungserscheinungen im Brückenzweige äußerte sich in einer Abhängigkeit der Einstellungen des Kondensators c_2 und der Selbstinduktion p_3:

1. von der Spannung;
2. von der Größe der Widerstände w_3 und w_4;
3. von der Schaltungsweise des Galvanometers und der damit verbundenen Änderung der Kapazität des Brückenzweiges.

Je höher die Spannung, je größer die Widerstände w_3 und w_4, oder die Kapazität des Brückenzweiges, desto kleinere Werte von c_2 und desto größere Werte von p_3 werden eingestellt.

Jeder der drei Fälle sei hier durch Beispiele gekennzeichnet, die in den folgenden Tabellen I und II zusammengestellt sind.

Der Einfluß zeigt sich deutlich an den Werten von $c_{1\infty}$ und $w_{1\infty}$, bzw. $c_{1\infty}\, w_{1\infty}$, die nach den Formeln (3) und (4) oder (5) und (6) aus den Versuchsdaten berechnet worden sind.

Wie wir aus Tabelle I sehen, wird die scheinbare Abhängigkeit von der Spannung: 1. desto größer, je größer die Widerstände $w_3 = w_4$ sind: bei Änderung der Spannung von 36 Volt auf 61 Volt effektiv ändert sich $c_{1\infty} w_{1\infty}$ bei $w_3 = w_4 = 500\ \Omega$ um 12 Proz., bei 350 Ω um 5 Proz., bei 200 Ω um 3 Proz. Bei $w_3 = w_4 = 100\ \Omega$ und $n/2\pi = 257$ fällt der Einfluß der Spannungsänderung bereits in den Bereich der Beobachtungsfehler; 2. bei gleich großen Widerständen $w_3 = w_4$ ist die scheinbare Abhängigkeit von der Spannung desto größer, je niedriger die benutzte Frequenz ist: bei $n/2\pi = 320$ und $w_3 = w_4 = 500\ \Omega$ entspricht der Änderung der Spannung von 36 auf 62 Volts effektiv eine Änderung von $c_{1\infty}\, w_{1\infty}$ um 1,2 Proz.; bei $n/2\pi = 257$ und $w_3 = w_4 = 500\ \Omega$ entspricht einer gleichen Änderung der Spannung die Änderung von $c_{1\infty}\, w_{1\infty}$ um 12 Proz.; bei $n/2\pi = 129$ ist noch

Tabelle I.

Scheinbarer Einfluß der Spannung (Kalkspat I bei 110°).

$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	$w_3 = w_4$ Ω	$c_1 \infty$ 10^{-3} MF.	$w_1 \infty$ $10^6\ \Omega$	$c_1 \infty\ w_1 \infty$	p_4 10^{-3} H.
320,5	62	500	$0{,}209_7$	$20{,}2_2$	$4{,}24_2$	1
	36		$0{,}210_0$	$20{,}4_5$	$4{,}29_5$	
257,0	65	500	$0{,}202_1$	17,0	$3{,}43_8$	1
257,1	61		$0{,}204_9$	$17{,}4_2$	$3{,}57_1$	1
257,0	51		$0{,}203_5$	17,5	$3{,}56_2$	1
257,1	51		$0{,}202_1$	$17{,}4_2$	$3{,}52_2$	10
257,1	37		$0{,}207_0$	18,8	$3{,}89_2$	1
257,1	36		$0{,}207_3$	18,8	$3{,}89_8$	1
257,1	22		$0{,}209_1$	$19{,}7_5$	$4{,}13_2$	1
257,1	61	350	$0{,}207_3$	$19{,}0_5$	$3{,}95_0$	1
	35		$0{,}209_9$	$19{,}7_4$	$4{,}14_0$	1
257,1	61	200	$0{,}209_8$	$21{,}0_3$	$4{,}41_3$	1
	61		$0{,}209_7$	$20{,}9_7$	$4{,}39_5$	1
	61		$0{,}209_9$	$20{,}8_2$	$4{,}37_2$	10
	36		$0{,}210_2$	$21{,}6_9$	$4{,}56_0$	1
	35		$0{,}210_9$	$21{,}2_8$	$4{,}48_9$	1
257,0	61	100	$0{,}210_9$	$20{,}9_4$	$4{,}41_8$	1
257,0	61		$0{,}210_4$	$21{,}2_2$	$4{,}46_8$	
256,8	61		$0{,}210_1$	$21{,}5_7$	$4{,}53_2$	
257,0	37		$0{,}210_8$	$20{,}8_7$	$4{,}40_0$	
257,0	38		$0{,}210_9$	$20{,}9_7$	$4{,}42_2$	
257,1	36		$0{,}210_0$	$21{,}0_8$	$4{,}42_8$	
256,7	32		$0{,}210_9$	$21{,}6_7$	$4{,}57_1$	
129,4	75	50	$0{,}192_0$	$19{,}9_8$	$3{,}83_8$	10
	74		$0{,}187_6$	$18{,}9_4$	$3{,}55_3$	1
	64		$0{,}193_4$	$20{,}4_6$	$3{,}95_9$	10
	63		$0{,}195_5$	$19{,}6_2$	$3{,}83_6$	1
	37		$0{,}205_9$	$20{,}7_0$	$4{,}26_4$	1
	37		$0{,}202_0$	$21{,}0_6$	$4{,}25_3$	10

Tabelle II.

Abhängigkeit von der Größe der Widerstände $w_3 = w_4$ (Kalkspat I bei 110°).

$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	$w_3 = w_4$ Ω	$c_1 \infty$ 10^{-3} MF.	$w_1 \infty$ 10^6 Ω	$c_1 \infty \, w_1 \infty$	p_4 10^{-3} H.
320,5	61	100	$0{,}210_2$	22,2	4,67	1
	62	100	$0{,}210_2$	22,0	4,64	
	61	200	$0{,}210_0$	21,5	4,52	
	61	200	$0{,}210_7$	21,3	4,48	
	62	500	$0{,}209_7$	20,2	4,24	
320,5	36	200	$0{,}208_6$	21,4	4,50	1
	36	500	$0{,}208_3$	20,5	4,30	
257,1	37	250	~	~	4,70	1
		500	~	~	3,86	
		750	~	~	3,32	
		1000	~	~	2,88	
257,1	36	200	$0{,}210_2$	21,7	4,56	1
		500	$0{,}207_3$	18,8	3,90	
257,1	61	200	$0{,}209_8$	21,0	4,41	1
		500	$0{,}204_9$	17,4	3,57	
257,1	61	100	$0{,}210_4$	21,3	4,49	1
		200	$0{,}209_8$	20,9	4,38	
		350	$0{,}207_3$	19,0	3,95	
257,1	35	200	$0{,}210_9$	21,3	4,49	1
		350	$0{,}209_9$	19,7	4,14	
129,4	37	25	$0{,}209_8$	21,0	4,40	1
		50	$0{,}205_9$	20,7	4,26	
129,4	64	25	$0{,}205_6$	20,8	4,27	1
		50	$0{,}194_5$	20,1	3,90	
129,4	75	25	$0{,}205_4$	20,9	4,30	1
		50	$0{,}189_8$	19,5	3,69	

bei $w_3 = w_4 = 50\ \Omega$ und gleicher Änderung der Spannung, wie vorhin, eine Änderung von $c_{1\infty} w_{1\infty}$ um 9 Proz. vorhanden, während bei $n/2\pi = 257$ schon für $w_3 = w_4 = 100\ \Omega$ diese Änderung von der Größe der Beobachtungsfehler ist.

Aus Tabelle II sehen wir deutlich, wie bei gleicher Spannung und Frequenz der Einfluß der Ladungsströme desto geringer wird, je kleiner $w_3 = w_4$ genommen werden.

Bei 37 Volt beträgt die der Änderung der Widerstände $w_3 = w_4$ von 250 Ω auf 1000 Ω entsprechende Änderung von $c_{1\infty} w_{1\infty}$ 39 Proz.; eine Änderung von 250 Ω auf 500 Ω ergibt 18 Proz., eine solche von 500 Ω anf 1000 Ω 26 Proz. Änderung von $c_{1\infty} w_{1\infty}$. Bei gleichgroßer Änderung von $w_3 = w_4$ ist die Änderung von $c_{1\infty} w_{1\infty}$ stets größer, je höher die Spannung ist: bei 61 Volt ist bei Änderung der Widerstände $w_3 = w_4$ von 200 auf 500 Ω die Änderung von $c_{1\infty} w_{1\infty}$ 19 Proz., während bei 26 Volt 14 Proz.

Der Einfluß der Größe von $w_3 = w_4$ wird desto schwächer, je höher die benutzte Frequenz ist. So beträgt bei $n/2\pi = 771$ und 36 Volt die Änderung von $c_{1\infty} w_{1\infty}$ erst beim Übergang von 500 Ω zu 1000 Ω 7 Proz., während bei $n/2\pi = 257$ die Änderung von $c_{1\infty} w_{1\infty}$ schon beim Übergang von 200 Ω zu 350 Ω 8 Proz. beträgt.

Bei $n/2\pi = 129$ und 37 Volt ist schon beim Übergang von 25 Ω zu 50 Ω ein Einfluß von 3 Proz. auf $c_{1\infty} w_{1\infty}$ vorhanden.

Endlich, wurde die Spannung einerseits zu hoch, die Widerstände $w_3 = w_4$ andererseits zu groß genommen, so war der Einfluß der Ladungsströme so stark, daß überhaupt keine Einstellung des Galvanometers auf Amplitude Null möglich war, es war nur ein Minimum zu erreichen.

Daß auch der Einfluß der Ladungsströme durch die verschiedene Schaltung der beiden Hälften des Ringelektromagneten am Vibrationsgalvanometer verändert werden konnte, zeigt folgende Versuchsreihe: bei $n\ 2\pi = 258{,}3$ und 75 Volt:

Vibrationsgalvanometer	$w_3 = w_4$	$c_{1\infty}$	$w_{1\infty}$	$c_{1\infty} w_{1\infty}$
	$\sim\ \Omega$	$\sim$	$\sim$	$\sim$
in Reihe geschaltet	100	$0{,}209_6$	21,34	4,473
parallel „	100	$0{,}207_3$	20,73	4,300
in Reihe „	100	$0{,}209_3$	21,56	4,515
„ „ „	200	$0{,}208_6$	20,36	4,247.

Eine Parallelschaltung beider Hälften des Elektromagneten bewirkt nahezu dieselbe Änderung des Wertes von $c_{1\infty}$ $w_{1\infty}$, wie eine Verdoppelung der Widerstände $w_3 = w_4$ bei hintereinander geschalteten Hälften.

Das läßt sich leicht erklären, wenn man annimmt, daß die Kapazität des Brückenzweiges im wesentlichen die des Ringelektromagneten ist; es ist dann offenbar die Kapazität und mit ihr der Ladungsstrom bei Parallelschaltung größer wie bei Reihenschaltung.

Was nun die Abhängigkeit des Einflusses der Ladungsströme einerseits von der Spannung, andererseits von der Größe der Widerstände $w_3 = w_4$ betrifft, so erklärt sich diese Abhängigkeit vollkommen identisch für beide Fälle.

Sowohl durch die Erhöhung der Spannung an sich, wie durch bloße Vergrößerung der Widerstände $w_3 = w_4$ wird jedesmal das Potential V und mit ihm der Ladungsstrom $n\,c\,V$ im Brückenzweige vergrößert. Es muß dann eine Verdoppelung der Spannung bei gleichbleibenden $w_3 = w_4$ denselben Einfluß haben, wie eine Verdoppelung der Widerstände $w_3 = w_4$ bei gleichbleibender Spannung, was auch wiederholt gefunden wurde.

Diese Feststellung gab den Weg an, welcher einzuschlagen war, um den Einfluß der Ladungsströme in den Bereich der Beobachtungsfehler hinunterzudrücken und brauchbare Werte für $c_{1\infty}$ und $w_{1\infty}$ zu erhalten: für jede Frequenz mußte derjenige Maximalwert von $w_3 = w_4$ aufgesucht werden, bei dem 1. der Einfluß der Spannung möglichst klein und von der Größenordnung der Beobachtungsfehler wurde; 2. eine weitere Verringerung der Widerstände $w_3 = w_4$ ohne wesentlichen Einfluß auf die Werte von $c_{1\infty}$ und $w_{1\infty}$ war.

Natürlich war auch dieser „Maximalwert“ $w_3 = w_4$ abhängig von der Größe des zu messenden Widerstandes $w_{1\infty}$ selbst, da, wie schon oben erwähnt, der störende Einfluß der Ladungsströme mit abnehmenden Werten von $w_{1\infty}$ zunahm.

Die Messungen mußten dann für jeden besonderen Fall bei verschiedenen Werten von $w_3 = w_4$, die kleiner als der „Maximalwert“ waren, vorgenommen werden.

Mit der Verringerung dieser Widerstände $w_3 = w_4$ konnte aber nicht zu weit gegangen werden, da sonst einerseits die

Einstellung der Kondensatoren c_2 und c_1' zu ungenau wurde und andererseits zu kleine Werte von $(p_3 - p_3')$ bestimmt werden mußten.

Um dem Umstande, daß noch wenn auch ein geringer systematischer Fehler, durch Ladungsströme verursacht, den Versuchsresultaten anhaften konnte und daß die Wahrscheinlichkeit für die Richtigkeit der Werte von $c_{1\infty}$, $w_{1\infty}$ mit der Verringerung von $w_3 = w_4$ wächst, Rechnung zu tragen, wurde bei der Mittelbildung aus den aus einer Versuchsreihe erhaltenen Werten, diesen verschiedene Gewichte beigelegt, die im allgemeinen umgekehrt proportional der benutzten Größe von $w_3 = w_4$ gesetzt wurden. Den Versuchsresultaten, die bei Parallelschaltung des Vibrationsgalvanometers und einem mindestens halb so kleinen Wert von $w_3 = w_4$, wie der Maximalwert bei Reihenschaltung, erhalten wurden, wurden dieselben Gewichte gegeben, als ob sie bei Reihenschaltung aber doppelt so großen Widerstand gewonnen wären.[1])

Wie aus den angeführten Zahlenbeispielen (Tab. I und II) zu ersehen ist, bewirkt die besprochene Fehlerquelle, daß durch ihren Einfluß die Werte $c_{1\infty}$ und $w_{1\infty}$ zu klein gemessen werden.

Wir wollen uns jetzt der Übersicht der übrigen sonst möglichen Fehlerquellen der Methode zuwenden.

2. Die Luftkondensatoren c_2 und c_1' werden als verlustfrei, ihr Isolationswiderstand als unendlich groß angenommen. Für die endgültigen Resultate für $w_{1\infty}$ kommt es wesentlich nur auf die Isolation des Luftkondensators c_1' an, gegen den auf dem Wege der Substitution der Kalkspatkondensator verglichen wurde. — Eine schlechte Isolation des Gerdienschen Kondensators c_2 (Hilfskondensator) würde für die Ergebnisse der Messung von sekundärem Einflusse sein. Jedenfalls würde sie aber den klaren Überblick über den Gang der Messungen beeinträchtigen. Deshalb wurde die Isolation beider Luftkondensatoren oft mittels eines Elektroskopes geprüft und Trockenmittel verwendet.

Der Gerdiensche Kondensator hatte dauernd Natriumtrocknung.

1) Diese Versuche sind in den Tabellen durch das Zeichen ′ bei den Werten $w_3 = w_4$ gekennzeichnet.

Das Innere des Boasschen Drehkondensators war gegen Feuchtigkeit dicht verschlossen, die äußeren Isolierungen wurden mit Schutzkappen versehen, an denen ebenfalls Natriumtrocknung angebracht wurde. — Während der feuchten Sommertage hatte sich nämlich die Isolation des Boasschen Kondensators verschlechtert und es wurden die Werte von p_3' etwas zu groß gemessen. — Für die Messungen bei hoher Temperatur war dies zwar von keiner Bedeutung, da die durch schlechte Isolation hervorgerufenen Änderungen von p_3' klein gegen die gemessene Differenz $(p_3 - p_3')$ blieben.

Nachdem die obigen Vorsichtsmaßregeln getroffen wurden, verbesserte sich die Isolation des Boasschen Kondensators und wär dann dauernd sehr gut.

Die Bernsteinisolationen der Gestelle beider Kalkspatplatten wurden auch bei der höchsten verwendeten Temperatur geprüft und erwiesen sich als vollkommen befriedigend.

3. *Widerstand r und Kapazität γ der Zuleitungen zu* c_1 Kalkspat).

Bezeichnen wir mit $c_{1\infty}$ und $w_{1\infty}$ wieder die aus den gemessenen Versuchskonstanten berechneten Größen (nach zwei von den Formeln (1) bis (6)) ohne Rücksicht auf r und γ, mit c_1 und w_1, die wirklichen, von r und γ nicht beeinflußten Werte, so ist

$$\frac{w_1}{1 + i n c_1 w_1} + \frac{r}{1 + i n \gamma r} = \frac{w_{1\infty}}{1 + i n c_{1\infty} w_{1\infty}}.$$

Hieraus erhalten wir

$$c_{1\infty} = c_1 - \frac{r}{w_1}(c_1 + \gamma)\frac{1 + n^2 c_1^2 w_1 r}{1 + n^2 (c_1 + \gamma)^2 r^2},$$

$$w_{1\infty} = w_1 \frac{1 + n^2 (c_1 + \gamma)^2 r^2}{1 + n^2 c_1^2 w_1 r}.$$

Der Widerstand r der Zuleitungen wurde wiederholt kleiner als 1 Ω gefunden, er war also vernachläßbar klein gegen den Widerstand w_1, der nach Megohm zählt.

Die Kapazität γ der Zuleitungen war, wie durch Kontrollversuche bestimmt wurde, sehr klein, jedenfalls kleiner wie $c_1/100$.

Berücksichtigt man, daß c_1, w_1 von der Größenordnung $2 \cdot 10^{-10}$ F., $10^7\,\Omega$ und n^2 höchstens $2 \cdot 10^7$ war, so folgt aus

den Formeln, daß sowohl r wie γ keinen wesentlichen Einfluß auf die Werte von $c_{1\infty}$ und $w_{1\infty}$ haben konnten.

4. *Die Selbstinduktionen Δp_3 und $\Delta p_3'$ der Zuleitungen* im Zweige 3 konnten vernachlässigt werden, da sie erstens sehr klein, höchstens von der Größenordnung 10^{-6} Henry waren, d. h. von derselben wie die Einstellgenauigkeit der Selbstinduktion am Variator; zweitens war ja stets $\Delta p_3 = \Delta p_3'$. In denjenigen Fällen, in welchen zur Berechnung die Formeln (3) und (4) oder (5) und (6) dienten, bei welchen die Differenz $(p_3 - p_3')$ für $w_{1\infty}$ maßgebend ist, heben sich die Selbstinduktionen der Zuleitungen also auf. Im Falle der Formeln (1) und (2) würde zu der Differenz $(p_3 w_3' - p_3' w_3)$ eine Korrektion hinzuzuaddieren sein, gleich $\Delta p_3 (w_3' - w_3)$.

Die Widerstände w_3 und w_3' unterschieden sich aber höchstens um 1 Proz., also ist diese Korrektion zu vernachlässigen.

Sonst kommen p_3 und p_3' nur noch in Korrektionsgliedern vor.

5. *Für die Kapazitäten c_3 und c_3'* der Widerstände und Induktionsrollen im Zweige 3 gilt die Korrektionsformel

$$w_1 = \frac{w_3^2 + n^2 p_3^2}{n^2 c_1' w_3 (p_3 - p_3') \left[1 + \frac{w_3^2 (c_3' - c_3)}{(p_3 - p_3')} + n^2 \frac{c_3' p_3'^2 - c_3 p_3^2}{(p_3 - p_3')} \right]}.$$

Da nun c_3' und c_3 an sich klein und voneinander wenig verschieden sind, so sind die Korrektionsglieder gegen 1 im allgemeinen zu vernachlässigen, ausgenommen der Fall, daß $p_3 - p_3'$ sehr klein und w_3 groß ist.

Dieser Fall kommt aber nur bei Messungen sehr großer Werte von w_1 vor, also Messungen, die an sich sehr ungenau sind.

6. *Dolezalekeffekt.* Die Widerstände w_3 und w_3' waren teils aus den Rheostatenwiderständen R_3 und R_3', teils aus den Widerständen r_3 und r_3' der Induktionsspulen gebildet. Bei kleinen Werten von w_3 und w_3' waren die Verhältnisse

$$\frac{r_3}{R_3} \quad \text{und} \quad \frac{r_3'}{R_3'}$$

so groß, daß ein Einfluß auf den Wert von $w_{1\infty}$ durch den Dolezalekeffekt[1]) zu befürchten war.

1) F. Dolezalek, Ann. d. Phys. **12.** p. 1142. 1903.

Bekanntlich wenn w der Gleichstromwiderstand einer Induktionsrolle ist, so ist ihr Widerstand bei Wechselstrom von der Frequenz n wegen der Stromverdrängung durch Wirbelströme

$$w' = w + k N^2, \text{ wo } N = n/2\pi \text{ ist.}^1)$$

Da nun $w_{1\infty}$ in erster Näherung proportional w_3 gemessen wird, so kann durch den Dolezalekeffekt eine scheinbare Abhängigkeit des Widerstandes $w_{1\infty}$ von der Frequenz beobachtet werden und zwar in dem Sinne, daß mit zunehmender Frequenz wachsende Werte von $w_{1\infty}$ sich ergeben.

Für die Größe dieser Abhängigkeit wird die Größe der Koeffizienten k maßgebend sein. Es wurde also eine Orientierungsversuchsreihe vorgenommen, bei der es sich darum handelte, festzustellen, wie groß bei den benutzten Induktionsrollen am Variator im Zweige 3 der Dolezalekeffekt ist.

Zu diesem Zwecke wurden vier verschiedene Schaltungen am Variator, die den Selbstinduktionswerten 2,850, 5,661, 9,847 und 14,150 entsprachen, nacheinander mit den beiden Normalrollen 1 und 10 Millihenry bei den Schwingungszahlen $N = 126{,}5$ und $N' = 257{,}2$ in der Wheatstoneschen Brücke verglichen.

Die Operatoren der vier Zweige der Brücke sind

$$a_1 = w_1 + k_1 N^2 + i n p_1 \qquad a_3 = w_3$$
$$a_2 = w_2 + k_2 N^2 + i n p_2 \qquad a_4 = w_4$$

Im Zweige 1 befand sich der Selbstinduktionsvariator, im Zweige 2 die betreffende Normalrolle. Zwischen den beiden Selbstinduktionen war ein kalibrierter Meßdraht aus Konstantan eingeschaltet, dessen Gesamtwiderstand $R = 4{,}106\ \Omega$ war.

Die Zuleitungen zu den Selbstinduktionen p_1 und p_2 waren durch ineinander gewickelte Litzen hergestellt. Es waren also ein jeder der Gleichstromwiderstände w_1 und w_2 gebildet von dem Gleichstromwiderstand r_1 oder r_2 der Rollen, vom Widerstand der Litze und von dem Widerstand des zugehörigen Teiles des Meßdrahtes. Die Bedingungsgleichungen für die Stromlosigkeit der Brücke sind

$$1.\ \frac{p_1}{p_2} = \frac{w_3}{w_4} \qquad 2.\ \frac{w_1 + k_1 N^2}{w_2 + k_2 w^2} = \frac{w_3}{w_4}.$$

1) M. Wien, Ann. d. Phys. **14.** p. 1. 1904.

Da nun die Gleichung (1) von der Frequenz unabhängig ist (die Kapazität der benutzten Selbstinduktionsrollen ist sehr klein), so muß für die beiden Schwingungszahlen N und $N' w_3/w_4$ dasselbe sein, was auch bei allen Messungen vollkommen der Fall war (die größte Abweichung war 0,1 Promille). Hieraus ergibt sich für die Schwingungszahlen N und N' nach Gleichung (2)

$$\frac{w_1 + k_1 N^2}{w_2 + k_2 N^2} = \frac{w_1' + k_1 N'^2}{w_2' + k_2 N'^2} .$$

Es zeigte sich aber weiter, daß die Einstellungen am Meßdraht für jedes Selbstinduktionsverhältnis ebenfalls nahezu unabhängig von der Frequenz waren, woraus folgt, daß $w_1 = w_1'$ und $w_2 = w_2'$ waren. Wir haben aber dann schließlich

$$k_1 = k_2 \frac{w_1}{w_2} = k_2 \frac{w_3}{w_4} .$$

Die den Werten 2,850, 5,661, 9,847 entsprechenden Schaltungen des Variators wurden mit der Normalen 1 Millihenry verglichen; die dem Wert 14,150 entsprechende Schaltung mit der Normalen 10 Millihenry.

Bezeichnen wir den Koeffizienten des Dolezalekeffektes für die Normale 1 Millihenry mit k_2', denjenigen für die Normale 10 Millihenry mit k_2'', so sind für die vier untersuchten Schaltungen des Selbstinduktionsvariators die Koeffizienten nacheinander gleich

$$3\,k_2', \quad 6\,k_2', \quad 10\,k_2' \quad \text{und} \quad 1{,}4\,k_2''.$$

Von den Koeffizienten k_2' und k_2'' konnte nur der zweite nach der Wienschen Formel[1]) berechnet werden, nämlich es war $k_2'' = 0{,}8 \cdot 10^{-7}$.

Bei k_2' war dies nicht möglich, da die Windungszahl der Rolle unbekannt war.

Jedenfalls war aber $k_2' \leqq k_2''$.

Für die benutzten Schaltungen des Variators würde also im schlimmsten Falle der Koeffizient k gleich $8 \cdot 10^{-7}$ sein.

Diejenigen Versuche mit der Kalkspatplatte, bei denen, wie oben bemerkt wurde, wegen der Kleinheit der Widerstände w_3 und w_3' ein Einfluß des Dolezalekeffektes zu befürchten war, wurden nur bei den Schwingungszahlen 128 und 256 ge-

1) M. Wien, Ann. d. Phys. **14**. p. 7. 1904.

macht. Die größten dabei stattfindenden Änderungen des Widerstandes durch den Effekt von Dolezalek würden also $8 \cdot 10^{-7}(128)^2 = 0{,}013\ \Omega$ und $8 \cdot 10^{-7}(256)^2 = 0{,}05\ \Omega$ betragen.

Da der kleinste benutzte Widerstand w_3 bei $n\,2\pi = 128$ gleich $15\ \Omega$, bei $n\,2\pi = 256$ gleich $50\ \Omega$ war, so war also im schlimmsten Falle der Einfluß höchstens ein Promille.

Man sieht also, daß der Dolezalekeffekt ohne Einfluß auf die Messungen von $w_{1\infty}$ war.

§ 5. Versuchsgang.

Die Versuche wurden nach dem folgenden Schema gemacht.

Saitenunterbrecher und Ventilator wurden in Gang gesetzt.

Nachdem die gewünschte Temperatur des Ofens erreicht war, wurden an den Rheostaten in den Zweigen 3 und 4 die entsprechenden Werte gezogen und Primär- und Sekundärkreis des Transformators geschlossen.

Es wurde dann diejenige Stellung des Quecksilberniveaus an der Unterbrecherstelle des Primärkreises gewählt, bei der die zeitlichen Schwankungen des Galvanometerausschlages am kleinsten waren, und mittels des Ruhstratwiderstandes im Primärkreise wurde die Effektivspannung auf den gewünschten Wert einreguliert.

Hatte nun der Saitenunterbrecher die der Resonanz mit dem Vibrationsgalvanometer entsprechende Frequenz, so wurde mit den Einstellungen am Selbstinduktionsvariator im Zweige 3 und des variablen Kondensators im Zweige 2 begonnen.

Es wurde zuerst der Kondensator auf Minimum des Ausschlages eingestellt, dann durch Variieren der Selbstinduktion im Zweige 3 das Minimum verbessert und so fort, bis der Ausschlag Null erreicht wurde.

Dann wurden die eigentlichen Beobachtungssätze vorgenommen. Auf einen Beobachtungssatz kamen zwei Einstellungen von c_2 mit je vier Einstellungen von p_3. Zwischen je zwei Beobachtungssätzen wurde die Frequenz am Saitenunterbrecher, die Spannung am Elektrometer, die Temperaturen des Ofens und des Zimmers kontrolliert und, wenn nötig, korrigiert. Es wurden für gewöhnlich bei einem Versuch 7—9 solcher Beobachtungssätze gemacht.

Es wurde dann die Substitution vorgenommen, indem der Kondensator c_2 auf denjenigen Teilstrich eingestellt wurde, der sich als Mittel der vorherigen Einstellungen ergab, und an Stelle des Kalkspatkondensators der Luftkondensator c_1' von Boas in den Zweig 1 gebracht wurde.

Es folgte eine Reihe von Beobachtungssätzen, indem jetzt c_1' am Boasschen Kondensator, und p_3' am Variator eingestellt wurde.

Die Widerstände an den Rheostaten R_3 und R_4 wurden immer so gezogen, daß sie zusammen mit den Gleichstromwiderständen der entsprechenden Variatorschaltung p_3 oder p_3' bzw. der Normalrolle p_4 die gewünschten Werte $w_3 = w_4$ ergaben. Es mußte also definitiv auch w_3 und w_3' einander nahezu gleich sein. Für diese Kompensation wurden die mit Gleichstrom bis auf 0,01 Ω gemessenen Widerstandswerte der Variatorschaltungen bis auf 0,1 Ω abgerundet. Hieraus ergab sich eine gewisse Abweichung von der Gleichheit der Widerstände w_3 und w_3', die aber nur bei kleinen Werten derselben in Betracht kam und dann auch berücksichtigt wurde, indem zur Berechnung die Formeln (1) und (2) benutzt wurden.

Die Einstellgenauigkeit der Kondensatoren c_2 und c_1' schwankte bei den Versuchen zwischen $2—5.10^{-7}$ MF. und war, wie bereits bemerkt wurde, desto größer, je größer die Widerstände $w_3 = w_4$ waren.

Die Einstellungen der Selbstinduktionen p_3 und p_3' wurden desto empfindlicher, je kleiner die Widerstände $w_3 = w_4$ waren: die relative Genauigkeit war aber dadurch nicht größer, da ja bei kleinen $w_3 = w_4$ kleinere Werte von $(p_3 - p_3')$ gemessen werden.

Bei der Schwingungszahl $n/2\pi = 256$ und $w_3 = w_4 = 100\,\Omega$ war die Einstellgenauigkeit $\pm$ 0,005 Millihenry, so daß noch ein Widerstand $w_1 = 40000$ Megohm bemerkt und der Größenordnung nach geschätzt werden konnte.

§ 6. Versuchsresultate.

Die Versuchsresultate, die mit allen Versuchsdaten am Schlusse vorliegender Arbeit in den Tabellen 1—32 ausführlich wiedergegeben sind, beziehen sich

1. auf den Einfluß der Frequenz auf die gemessenen Größen $c_{1\infty}$ und $w_{1\infty}$;

2. auf die Änderung der Kapazität und des Widerstandes beider Kalkspatplatten mit der Temperatur;

3. auf den Einfluß der Bestrahlung mit X-Strahlen auf die Leitfähigkeit von Kalkspat.

1. Einfluß der Frequenz.

Da durch Vorversuche festgestellt wurde, daß der Einfluß jedenfalls gering ist, so wurden Versuche mit verschiedenen Frequenzen nur bei höherer Temperatur angestellt.

Tabelle III.

Einfluß der Frequenz. Kalkspatplatte I bei 110,1°.

Tab. Nr.[1])	Versuch Nr.[1])	Datum 1911	$E_{\text{eff.}}$ Volt	$\frac{n}{2\pi}$	c_{10} [2]) 10^{-3}MF.	$w_3 = w_4$ Ω	$c_{1\infty}$ 10^{-3}MF.	$w_{1\infty}\ 10^6\ \Omega$	$c_{1\infty}\ w_{1\infty}$
1		3. I.		772,4	$0{,}203_4$				
3	1	5. u. 6. I.	36	772,0		500	$0{,}209_8$	22,44	4,710
	2	6. I.		771,6		500	$0{,}210_1$	21,93	4,610
	3	7. I.		771,8		500	$0{,}210_5$	21,78	4,585
	4	8. I.		771,2		500	$0{,}210_4$	21,41	4,505
	5	8. I.		771,4		500	$0{,}210_1$	22,20	4,670
		Mittel		771,6			$0{,}210_2$	21,95	4,616
							$\pm$ 0,0001	$\pm$ 0,18	$\pm$ 0,035
1		10. I.		771,2	$0{,}204_0$				
1		13. I.		257,0	$0{,}203_9$				
2	1	23. I.	37	257,0		100	$0{,}210_8$	20,87	4,400
	3	23. I.	38	257,0		100	$0{,}210_9$	20,97	4,422
	5	25. I.	36	257,1		100	$0{,}210_0$	21,08	4,428
	6	25. I.	36	$257{,}0_5$		200	$0{,}210_2$	21,69	4,560
		Mittel		$257{,}0_4$			$0{,}210_5$	21,08	4,437
							$\pm$ 0,0002	$\pm$ 0,11	$\pm$ 0,022
1		24. I.		257,0	$0{,}203_6$				
1		27. I.		257,1	$0{,}203_5$				

1) Die Nummern in Spalte 1 und 2 beziehen sich auf die Tabellen am Schlusse der Abhandlung.

2) Mit c_{10} ist die Kapazität der Kalkspatplatte bei Zimmertemperatur gemeint.

Bei der Kalkspatplatte I wurde die Temperatur 110° gewählt und die Schwingungszahlen 772, 320, 257 und 129 benutzt. Da nur ein Vibrationsgalvanometer vorhanden war, so war es nicht möglich, abwechselnd einzelne Versuche mit der einen, dann mit der anderen Frequenz zu machen, es mußte vielmehr zuerst eine ganze Versuchsreihe mit der einen und darauf mit der anderen Frequenz ausgeführt werden. — An eine Versuchsreihe mit einer der Schwingungszahlen 771, 320 und 129 wurde immer eine bei der Schwingungszahl 256 angeschlossen.

Die Versuchsergebnisse sind in den Tabellen III, IV und V zusammengestellt.

Da bei der Bestimmung der Kapazität $c_{1\infty}$ eine gewisse Unsicherheit vorhanden war, was sich auch bei den später zu beschreibenden Versuchen über die Abhängigkeit von der Tem-

Tabelle IV.

Einfluß der Frequenz. Kalkspatplatte I bei 110,1°.

Tab. Nr.	Versuch Nr.	Datum 1911	$E_{\text{eff.}}$ Volt	$\frac{n}{2\pi}$	c_{10} 10^{-3}MF.	$w_3 = w_4$ Ω	$c_{1\infty}$ 10^{-3}MF.	$w_{1\infty}$ 10^6 Ω	$c_{1\infty}\, w_{1\infty}$
1		24. I.		257,0	$0{,}203_6$				
1		27. I.		257,1	$0{,}203_5$				
2	4	25. I.	61	257,0		100	$0{,}210_4$	21,22	4,468
	7	25. I.		$257{,}0_5$		200	$0{,}209_8$	21,03	4,413
	8	28. I.		$257{,}0_5$		200	$0{,}209_7$	20,97	4,395
	9	28. I.		257,1		100	$0{,}210_4$	21,32	4,490
	10	28. I.		$257{,}0_5$		200	$0{,}209_9$	20,82	4,373
		Mittel		$257{,}0_5$			$0{,}210_1$	21,13	4,442
							$\pm$ 0,0001	$\pm$ 0,07	$\pm$ 0,018
1		30. I.		$257{,}0_5$	$0{,}203_5$				
1		31. I.		$320{,}3_5$	$0{,}203_5$				
4	1	31. I.	61	320,5		100	$0{,}210_2$	22,20	4,670
	2	31. I.	61	$320{,}5_2$		200	$0{,}210_0$	21,50	4,517
	3	31. I.	61	320,5		200	$0{,}210_7$	21,25	4,478
	4	2. II.	62	320,5		100	$0{,}210_2$	22,05	4,640
	6	2. II.	62	320,5		200	$0{,}210_0$	21,53	4,524
		Mittel		320,5			$0{,}210_2$	21,83	4,594
							$\pm$ 0,0001	$\pm$ 0,15	$\pm$ 0,028
1		4. II.		320,5	$0{,}203_3$				

Tabelle V. Einfluß der Frequenz. Kalkspatplatte I bei 110,1°.

Tab. Nr.	Versuch Nr.	Datum 1911	$E_{eff.}$ Volt	$\frac{n}{2\pi}$	c_{10} 10^{-3}MF.	$w_3 = w_4$ Ω	$c_{1\infty}$ 10^{-3}MF.	$w_{1\infty}$ $10^6\ \Omega$	$c_{1\infty}\, w_{1\infty}$
1		4. II.		320,5	$0{,}203_3$				
2	12	12. III.	61	$256{,}7_8$		100	$0{,}210_1$	$21{,}5_7$	$4{,}53_2$
	13	12. III.	32	$256{,}6_8$		100	$0{,}210_9$	$21{,}6_7$	$4{,}57_1$
	14	12.u.13.III	62	$256{,}6_3$		200	$0{,}209_3$	$21{,}2_6$	$4{,}45_0$
			Mittel	256,7			$0{,}210_2$ ± 0,0004	$21{,}5_5$ ± 0,08	$4{,}53_1$ ± 0,022
1		18. III.		$129{,}2_5$	$0{,}203_4$				
5	1	24. III.	63	$129{,}4_5$		25	$0{,}206_8$	$21{,}1_3$	$4{,}37_3$
	2	25. III.	74	$129{,}3_5$		25	$0{,}205_9$	$21{,}0_4$	$4{,}33_5$
	3	26. III.	37	129,4		25	$0{,}209_6$	$21{,}0_0$	$4{,}40_2$
	4	3. IV.	64	129,4		25	$0{,}204_3$	$20{,}6_8$	$4{,}22_8$
	5	5. IV.	64	129,4		25	$0{,}205_8$	$20{,}5_6$	$4{,}23_0$
	6	5. IV.	75	$129{,}3_5$		25	$0{,}204_9$	$20{,}8_2$	$4{,}26_9$
			Mittel	129,4			$0{,}206_2$ ± 0,0008	$20{,}8_7$ ± 0,09	$4{,}30_6$ ± 0,030
1		8. IV.		129,4	$0{,}203_2$				
2	17	9.u.10.IV.	75	$258{,}1_7$		100	$0{,}209_7$	$21{,}4_0$	$4{,}49_0$
	18	16.u.17.IV.		258,3		50	$0{,}209_9$	$21{,}5_0$	$4{,}51_2$
	19	17. IV.		258,3		100	$0{,}209_6$	$21{,}3_4$	$4{,}47_3$
	20	20. V.		$258{,}3_2$		100	$0{,}209_3$	$21{,}5_8$	$4{,}51_5$
			Mittel	$258{,}2_7$			$0{,}209_7$ ± 0,0001	$21{,}4_8$ ± 0,04	4,500 ± 0,008
1		18. IV.		$258{,}3_3$	$0{,}202_4$				
1		27. V.		$258{,}3_8$	$0{,}202_2$				

Tabelle VI. Kalkspatplatte I bei 110,1°.

Tab. Nr.	Versuch Nr.	Datum 1911	$E_{eff.}$ Volt	$\frac{n}{2\pi}$	$w_3 = w_4$ Ω	$c_{1\infty}$ 10^{-3}MF.	$w_{1\infty}$ $10^6\ \Omega$	$c_{1\infty}\, w_{1\infty}$
2	15	9. IV.	75	2·129,15	100	$0{,}209_5$	$21{,}4_0$	$4{,}48_6$
	16	9. IV.	75	2·129,15	100	$0{,}209_3$	$21{,}6_0$	$4{,}52_4$
			Mittel	2·129,15		$0{,}209_4$	$21{,}5_0$	$4{,}50_5$
2	17							
	18		75	258,27		$0{,}209_7$	$21{,}4_6$	$4{,}50_0$
	19							
	20							

peratur zeigte, so sind neben den Werten von $c_{1\infty}$ und $w_{1\infty}$ in der letzten Kolonne auch die Werte des Produktes $(c_{1\infty} w_{1\infty})$ angegeben, die sich unabhängig von Wert c_1' der Kapazität des Substitutionskondensators berechnen lassen, indem man die Formeln (1) und (2) oder (3) und (4) oder (5) und (6) miteinander multipliziert.

Bei den in der Tabelle III zusammengestellten Versuchen mit der Schwingungszahl 772 war das Vibrationsgalvanometer nicht wie sonst auf den Grundton des Saitenunterbrechers, sondern auf dessen I. Oberton eingestimmt. — Daß dadurch keine anderen Werte von $c_{1\infty}$ und $w_{1\infty}$ gemessen worden sind als diejenigen, welche der Grundschwingung entsprechen würden, zeigt Tab. VI, in der Werte von $c_{1\infty}$ und $w_{1\infty}$ zusammengestellt sind, die einmal mit dem I. Obertone des Saitenunterbrechers, dessen Grundton 129,15 war, das andere Mal mit dem Grundton 258,27 direkt gemessen worden sind. — Die Übereinstimmung der in beiden Fällen erhaltenen Werte ist innerhalb der Beobachtungsgrenzen eine vollkommene.

Vergleicht man die in der Tab. IV bei $n/2\pi = 257{,}0$ gemessenen Werte von $w_{1\infty}$ mit den in der Tab. V bei $n/2\pi = 256{,}7$ und 258,3 gemessenen, so weisen diese Werte eine nicht unbeträchtliche Abweichung auf: für $w_{1\infty}$ haben wir nach Tab. IV 21,13 Megohm, nach Tab. V aber 21,55 und 21,46.

Es hat sich also der Widerstand der Kalkspatplatte in der Zwischenzeit vergrößert. Dies war verursacht durch den Umstand, daß die äußere Leitfähigkeit der Kalkspatplatte bei den Versuchen der Tab. IV größer geworden war. Zur Beseitigung der Feuchtigkeit wurde nämlich bei diesen Versuchen das Innere des elektrischen Ofens dauernd mit Chlorcalcium getrocknet. Wie nach einiger Zeit aber festgestellt worden ist hat eine das Chlorcalcium verunreinigende Substanz sublimiert, was an einer Glanzlosigkeit der blanken Metallteile im Innern des Ofens bemerkt wurde. Nachdem nun, wie vor den Versuchen, die nicht versilberten Teile der Kalkspatplatte mit Alkohol und ausgekochtem destilliertem Wasser abgewaschen und mit konzentrierter Schwefelsäure getrocknet worden sind, verringerte sich auch die äußere Leitfähigkeit.

Bei den weiteren Versuchen mit Kalkspat I wurde von einer Trocknung während des Heizens abgesehen und nur in

der Zeit zwischen den Versuchen bei Zimmertemperatur mit konzentrierter Schwefelsäure getrocknet.

Die mit c_{10} bezeichneten, in der 6. Kolonne angegebenen Werte sind der Tab. I am Schlusse entnommen und geben den Wert der Kapazität der Kalkspatplatte bei Zimmertemperatur an. Wie es sich namentlich aus den in der Tab. V angegebenen Werten ergibt, fand eine kleine Abnahme des Wertes c_{10} mit der Zeit statt, die sich dadurch erklärt, daß mit der Anzahl der Heizversuche schlecht an die Kalkspatplatte adhärierende Silberteilchen sich von derselben infolge der häufigen Erhitzungen und Abkühlungen lösten und so die

Tabelle VII.

Einfluß der Frequenz. Kalkspatplatte II bei 149,4°.

Tab. Nr.	Versuch Nr.	Datum 1911	$E_{\text{eff.}}$ Volt	$\frac{n}{2\pi}$	c_{10} 10^{-3}MF.	$w_3 = w_4$ Ω	$c_{1\infty}$ 10^{-3}MF.	$w_{1\infty}$ $10^6\ \Omega$	$c_{1\infty}\ w_{1\infty}$
15		9. XI.		$257{,}2$	$0{,}164_5$				
26a	1	9. XI.	72	$257{,}2_5$		200	$0{,}172_3$	$44{,}7$	$7{,}70_2$
	2	9. XI.	72	$257{,}3$		150	$0{,}172_3$	$44{,}6$	$7{,}68_5$
	3	10. XI.	72	$257{,}2$		150	$0{,}172_3$	$44{,}5$	$7{,}67_0$
	4	10. XI.	72	$257{,}2_5$		280	$0{,}172_3$	$44{,}1$	$7{,}60_0$
	5	12. XI.	72	$257{,}3$		280	$0{,}172_3$	$44{,}1$	$7{,}60_0$
	6	12. XI.	72	$257{,}3$		100 //	$0{,}172_2$	$44{,}5$	$7{,}66_4$
	9	12. XI.	72	$257{,}3$		50 //	$0{,}172_5$	$44{,}6$	$7{,}69_2$
			Mittel	$257{,}2_7$			$0{,}172_3$ ± 0,0001	$44{,}5_0$ ± 0,04	$7{,}67_0$ ± 0,007
27	1	16. XI.	72	$126{,}8$		25	$0{,}171_9$	$43{,}1$	$7{,}41_0$
	2	16. XI.	72	$126{,}8_5$		20	$0{,}171_9$	$42{,}6$	$7{,}32_3$
	3	16. XI.	72	$126{,}8$		15	$0{,}172_0$	$43{,}1$	$7{,}41_3$
			Mittel	$126{,}8_2$			$0{,}171_9$ ± 0,0001	$42{,}9_4$ ± 0,04	$7{,}38_4$ ± 0,005
26b	1	24. XI.	72	$257{,}3_5$		100	$0{,}172_0$	$45{,}6$	$7{,}84_2$
	2	24. XI.	72	$257{,}3_3$		100 //	$0{,}172_1$	$44{,}4$	$7{,}64_0$
	3	24. XI.	72	$257{,}3_3$		50 //	$0{,}172_1$	$45{,}2$	$7{,}78_0$
	4	24. XI.	72	$257{,}3$		50	$0{,}172_0$	$45{,}4$	$7{,}80_8$
	5	24. XI.	72	$257{,}3$		150	$0{,}171_6$	$46{,}1$	$7{,}91_0$
			Mittel	$257{,}3_2$			$0{,}172_0$ ± 0,0001	$45{,}4$ ± 0,08	$7{,}80_3$ ± 0,012
15		1. XII.		$257{,}4$	$0{,}164_5$				

Tabelle VIII.

Einfluß der Frequenz. Kalkspatplatte II bei 139,1° ~ 139,5°.

Tab. Nr.	Versuch Nr.	Datum 1911	$E_{eff.}$ Volt	$\frac{n}{2\pi}$	c_{10} 10^{-3} MF.	$w_3 = w_4$ Ω	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ 10 Ω	$c_{1\infty}\ w_{1\infty}$
15	12	8. XI.			$0{,}164_5$				
25	1	8. XI.	70	$257{,}2_5$		200	0,1719	80,0	$13{,}7_5$
	2	8. XI.	70	$257{,}2_5$		150	0,1719	78,1	$13{,}4_3$
	3	8. XI.	70	$257{,}2_5$		300	0,1721	78,9	$13{,}5_8$
			Mittel	$257{,}2_5$			0,1720	79,0	$13{,}5_9$
							± 0,0001	± 0,6	± 0,09
28	1	17. XI.	72	126,8		40	0,1718	78,6	$13{,}5_1$
	2	17. XI.	72	126,8		30	0,1715	74,7	$12{,}8_2$
	3	17. XI.	72	126,8		20	0,1515	74,0	$12{,}7_0$
			Mittel	126,8			0,1716	75,8	$13{,}0_3$
							± 0,0001	± 1,4	± 0,25
25	4	26. XI.	72	257,4		80	0,1718	77,6	$13{,}3_4$
	5	26. XI.	72	257,4		150	0,1718	76,5	$13{,}1_5$
	6	26. XI.	72	257,4		200	0,1719	78,9	$13{,}5_7$
			Mittel	257,4			0,1718	77,7	$13{,}3_5$
							± 0,0001	± 0,7	± 0,12
15	14	1. XII.			$0{,}164_5$				

wirksame Kondensatorfläche kleiner wurde. Was den untersuchten Einfluß der Frequenz anbelangt, so zeigt sich aus den Tab. III und IV, daß der Widerstand $w_{1\infty}$ mit *abnehmender Frequenz abnimmt*, während die Kapazität $c_{1\infty}$ unverändert bleibt.

Eine Abweichung zeigen die bei der Frequenz 129 gemessenen Werte der Tab. V. Neben einer Abnahme des Widerstandes $w_{1\infty}$ zeigt sich eine Abnahme der Kapazität $c_{1\infty}$.

Die Erklärung hierfür ist, daß bei diesen Versuchen der in § 4 erwähnte „Maximalwert" von $w_3 = w_4$ mit 25 Ω noch nicht erreicht war, was die starke scheinbare Abhängigkeit der Kapazität von der Spannung zeigt.

Der bei niedrigster Spannung (37 Volt) gemessene Wert von $c_{1\infty} = 0{,}2096 \cdot 10^{-3}$ MF. kommt den bei den Schwingungszahlen 256,7 und 258,3 gemessenen Werten $0{,}210_2 \cdot 10^{-3}$ MF. und $0{,}209_7 \cdot 10^{-3}$ MF. sehr nahe, trotzdem bleibt der entsprechende Wert $w_{1\infty} = 21{,}00$ Megohm stark hinter den Werten bei 256,7 und 258,3 zurück.

Obwohl also den Versuchen bei $n/2\pi = 129{,}4$ wegen des nicht hinreichend eliminierten Einflusses der Ladungsströme eine mindere Bedeutung beizulegen ist, scheint auch hier derselbe Einfluß der Frequenz wie bei den anderen Schwingungszahlen auf den Widerstand $w_{1\infty}$ vorhanden zu sein.

Die Versuche über den Einfluß der Frequenz mit der Kalkspatplatte II wurden bei den Temperaturen 149,4° und 139,1° bzw. 139,5° vorgenommen, in beiden Fällen waren die benutzten Schwingungszahlen 257,3 und 126,8.

Die Resultate geben die Tabellen VII und VIII wieder. Es war diesmal der „Maximalwert" auch für die Schwingungszahl 126,8 erreicht und das Ergebnis der Versuche über den Einfluß der Frequenz ist das gleiche wie bei der Kalkspatplatte I: kein wesentlicher Einfluß auf die Kapazität, Abnahme des Widerstandes $w_{1\infty}$ mit abnehmender Frequenz.

(Bei diesen, wie auch bei allen übrigen Versuchen mit der Kalkspatplatte II, wurde als Trockenmittel im Innern des Ofens dauernd auch bei hoher Temperatur Phosphorpentoxyd verwendet, das sich im Gegensatz zu Chlorcalcium ausgezeichnet bewährte.)

Es mag noch besonders hervorgehoben werden, daß die durch obige Versuche der Tab. III—VIII festgestellte Abnahme des Widerstandes $w_{1\infty}$ mit abnehmender Frequenz als eine reelle, d. h. von der Natur der elektrischen Konstanten des Kalkspates bedingte anzusehen ist, und nicht von Nebeneinflüssen herrührt.

Obwohl nämlich ein Dolezalekeffekt der Widerstände im Zweige 3 eine Abhängigkeit im gleichen Sinne von der Frequenz vorspiegeln könnte, so war derselbe bei allen Versuchen, wie im § 3 dargelegt wurde, vernachläßbar klein.

Der Einfluß der Ladungsströme zeigt sich zwar ebenfalls in einer Abnahme von $w_{1\infty}$ und wird auch selbst stärker mit abnehmender Frequenz, aber in den Versuchen der Tabb. III, IV, VI, VII und VIII ist diesem Umstande genügend Rechnung getragen worden, da sie ja alle bei Werten von $w_3 = w_4$ gemacht wurden, die kleiner oder höchstens gleich dem Maximalwerte waren und dadurch auch keine systematische Abhängigkeit der Werte $c_{1\infty}$ und $w_{1\infty}$ von der Größe der Widerstände $w_3 = w_4$ vorhanden war, die ja ein sicheres Kri-

terium für die Größe des Einflusses jener Fehlerquelle ist. — Die noch vorhandenen Abweichungen der einzelnen Werte $c_{1\infty}$ und $w_{1\infty}$ bei ein und derselben Schwingungszahl rühren offenbar nur noch von Beobachtungsfehlern her. — Dies tritt besonders deutlich bei den Versuchen mit Kalkspatplatte II der Tabb. VII und VIII hervor.

2. Abhängigkeit von der Temperatur.

Die Versuche über die Abhängigkeit der Kapazität und des Widerstandes der Kalkspatplatten von der Temperatur sind in den Tab. IX—XIV zusammengestellt.

Die Kalkspatplatte I wurde im Temperaturbereich von 40°—115° bei der Schwingungszahl 258,3 und 75 Volt Effektivspannung gemessen, und zwar wurde mit den Messungen bei höherer Temperatur begonnen.

Zwischen je zwei Heizversuchen wurden Kapazität und Widerstand der Kalkspatplatte bei Zimmertemperatur zur Kontrolle gemessen, die entsprechenden Werte c_{10} und w_{10} sind in der Tab. IX angegeben. Wie die Werte w_{10} zeigen, war wegen der Luftfeuchtigkeit während der Messung bei tiefsten Temperaturen offenbar die äußere Leitfähigkeit der Kalkspatplatte I beträchtlich gestiegen und deshalb sind die Messungen von $w_{1\infty}$ bei 40°, 50° und 60° unzuverlässig. Bei höheren Temperaturen ist wegen der wachsenden inneren Leitfähigkeit der Einfluß der äußeren an sich geringer, und die äußere Leitfähigkeit selbst, soweit sie durch Feuchtigkeit gefördert wird, nimmt mit steigender Temperatur ab.

In der letzten Kolonne der Tab. IX sind die aus den Werten für $w_{1\infty}$ berechneten Werte der Leitfähigkeit in $10^{-12}\ \frac{1}{\Omega \cdot \mathrm{cm}}$ angegeben, die unter Benutzung des Curieschen Wertes für die Dielektrizitätskonstante des Kalkspates bei Zimmertemperatur in der Richtung senkrecht zur Achse $\varepsilon = 8{,}5$ nach der Formel

$$\sigma_{t^0} = \frac{8{,}5}{4\pi}\,\frac{10}{9}\,\frac{1}{c_{10}\,w_{1t^0}}\,10^{-12}$$

berechnet worden ist, wobei die Kapazität c_{10} der Kalkspatplatte bei Zimmertemperatur in Mikrofarad und der Widerstand w_{1t^0} bei der Temperatur t^0 in Megohm gemessen wurde.

In der Tab. X sind neben den Leitfähigkeiten deren Ver-

Tabelle IX.

Kalkspatplatte I. Abhängigkeit von der Temperatur.

Tab. Nr.	Datum 1911	$E_{\text{eff.}}$ Volt	$\frac{n}{2\pi}$	c_{10} [1]) 10^{-8} MF.	w_{10} [1]) $10^6\ \Omega$	t^0	$c_1{}^8$ 10^{-3} MF	$w_1{}^8$ $10^6\ \Omega$	$\sigma_t{}^0$ $\frac{1}{10^{-12}\ \Omega\text{cm}}$
1	2. VI.			$0{,}202_2$	1420				
14	2. u. 3. VI.	72	258,3			40,0°	$0{,}203_4$	1041 ±57	3,6
13	1. VI.	75	258,3			50,0°	$0{,}204_4$	901 ±60	4,1
1	31. V.			$0{,}202_2$	1087				
12	29. u. 30. V.	75	$258{,}3_3$			59,9°	$0{,}205_2$	648 ±26	5,7
1	29. V.			$0{,}202_2$	1370				
11	27. u. 28. V.	75	$258{,}3_5$			69,7°	$0{,}205_9$	323 ±4	11,5
1	27. V.			$0{,}202_2$	1270				
10	2. u. 3. V., 20., 25., 26. V.	75	$258{,}3_6$			79,7°	$0{,}206_9$	174,5 ±1,4	21,3
1	4. V.			$0{,}202_2$	1920				
9	30. IV. u. 1. u. 2. V. 11.	75	$258{,}3_3$			89,6°	$0{,}208_2$	86,2 ±1,8	43,1
1	29. IV.			$0{,}202_2$	1920				
8	27., 28., 29. IV.	75	$258{,}3_4$			100,2°	$0{,}208_5$	41,78 ±0,21	89,0
1	27. IV.			$0{,}202_0$	4000				
7	24. u. 25. IV.	75	$258{,}3_4$			105,1°	$0{,}208_6$	29,05 ±0,20	127,9
1	18. IV.			$0{,}202_4$	4300				
2	9., 10., 16., 17. IV. u. 20. V.	75	$258{,}2_7$			110,1°	$0{,}209_7$	21,46 ±0,04	173,0
1	15. IV.			$0{,}202_4$	10000				
6	19., 20., 21. IV.	75	$258{,}3_2$			115,0°	$0{,}210_1$	15,63 ±0,06	237,6

1) c_{10} und w_{10} beziehen sich auf Zimmertemperatur.

hältnisse für die nahezu gleichen Temperaturintervalle von 10^0 zu 10^0, sowie die natürlichen Logarithmen der Leitfähigkeit und deren Differenzen angegeben.

Wie aus diesen Werten zu ersehen ist, steigt die Leitfähigkeit mit der Temperatur, und zwar von 60^0—100^0 immer rascher, dann langsamer. Die maximale Änderung findet

Tab. X.

Kalkspatplatte I bei

$$\frac{n}{2\pi} = 258{,}3.$$

t^0	$10^{-12} \frac{1}{\sigma_t^0 \Omega \text{ cm}}$	$\sigma_{t^0_2}/\sigma_{t^0_1}$	lg $\sigma_t{}^0$	diff lg $\sigma_t{}^0$
40,0°	3,6		1,27	
		1,2 ± 12%		0,15
50,0°	4,1		1,42	
		1,4 ± 10%		0,33
59,9°	5,7		1,75	
		2,00 ± 5%		0,69
69,7°	11,5		2,44	
		1,85 ± 2%		0,62
79,7°	21,3		3,06	
		2,03 ± 3%		0,71
89,6°	43,1		3,77	
		2,06 ± 2,5%		0,72
100,2°	89,0		4,49	
				0,37
105,1°	127,9	1,94 ± 0,7%	4,86	
				0,30
110,1°	173,0	1,86 ± 0,7%	5,16	
				0,32
115,0°	237,6		5,48	

zwischen 90^0 und 100^0 statt und beträgt etwa 100 Proz. Im Intervall 60^0—115^0 wird die Leitfähigkeit 40mal so groß.

Die Versuche über die Temperaturabhängigkeit der Kalkspatplatte II sind in der Tab. XI zusammengestellt. — Da diese Kalkspatplatte eine weit geringere Leitfähigkeit besaß, so mußte mit der Temperatur viel höher gestiegen werden, um Widerstandswerte von ungefähr derselben Größenordnung, wie die kleinsten bei Platte I beobachteten zu erreichen. Es wurde im Temperaturintervall von 50^0—150^0 von 10^0 zu 10^0 gemessen, und zwar von niedrigen zu höheren Temperaturen.

Die Resultate sind in den Kolonnen 7 und 9 angegeben (Werte *A*). — Zwischen den Heizversuchen wurden auch hier Messungen bei Zimmertemperatur gemacht.

Um sich davon überzeugen zu können, inwieweit bei ein und derselben Temperatur die Leitfähigkeit konstant und unabhängig von sonstigen Umständen, z. B. einer vorherigen Abkühlung oder Erhitzung bleibt, wurde, nachdem die höchste Temperatur erreicht ward, nacheinander und zwar ohne Unterbrechung des Heizstromes bei den Temperaturen

$$149{,}4^0 \sim 119{,}9^0;\ 139{,}5^0 \sim 110{,}1^0;\ 129{,}6^0 \sim 100{,}2^0$$

gemessen.

Die erhaltenen Werte für $c_{1\infty}$ und $w_{1\infty}$ befinden sich in den Kolonnen 8 und 10 der Tab. XI und sind besonders noch in Tab. XII in zeitlicher Aufeinanderfolge zusammengestellt.

Trotz wiederholten Erhitzens und Abkühlens zeigen die Werte $w_{1\infty}$ gegenüber den zuerst gemessenen nur geringe Abweichungen.

Bei den zeitlich am weitesten auseinanderstehenden Messungen bei 100,2° fallen die Abweichungen zwischen die Beobachtungsgrenzen. Die größten Abweichungen ergeben sich bei den Temperaturen 149,4° (2 Proz.) und 119,9° (4 Proz.), aber im entgegengesetzten Sinne.

Anders verhält es sich mit der Kapazität $c_{1\infty}$. Die Werte derselben in der Versuchsreihe B (Kolonne 8 der Tab. XI) sind sämtlich kleiner wie diejenigen der Versuchsreihe A. Die größte Abweichung zeigen die Werte bei 110,1°, nämlich 0,6 Proz. Die Ursache für diese Verschiedenheit der Werte $c_{1\infty}$ in den beiden Versuchsreihen ist in der gewissen Unsicherheit zu suchen, die der Bestimmung der Kapazität überhaupt anhaftete und die schon oben bei der Besprechung der Versuche über den Einfluß der Frequenz (s S. 39) angedeutet wurde.

Bei der Kalkspatplatte I kann man über die zeitliche Konstanz der Leitfähigkeit und der Kapazität schon aus den obigen Versuchen über den Einfluß der Frequenz der Tabb. III, IV und V urteilen, die auf eine lange Zeit ausgedehnt wurden.

Zur Sicherheit ist aber die Versuchsreihe bei 79,7° durch Messungen bei 110° unterbrochen worden. Die bei 110° gemessenen Werte von $c_{1\infty}$, $w_{1\infty}$ (vgl. Schlußtabelle 2, Versuch Nr. 20) stimmen mit den über einen Monat früher gemessenen

Tabelle XI.

Kalkspatplatte II.

Tab. Nr.	Datum	E_{eff}. Volt	$\frac{n}{2\pi}$	c_{10} 10^{-3} MF.	t^0	A. c_1^{∞} 10^{-3} MF.	B. c_1^{∞} 10^{-3} MF.	A. w_1^{∞} $10^6\,\Omega$	B. w_1^{∞} $10^5\,\Omega$
15	22. X. 11	72		$0{,}164_6$					
16	23. X. 11	72	257,0		$50{,}0^0$	$0{,}166_6$		7100 ± 2000	
15	24. X. 11			$0{,}164_4$					
17	24. X. 11	72	$257{,}0_6$		$59{,}9^0$	$0{,}167_3$		4040 ± 400	
15	25. X. 11			$0{,}165_0$					
18	26. X. 11	72	257,1		$69{,}7^0$	$0{,}167_7$		2260 ± 370	
15	27. X. 11			$0{,}164_5$					
19	27. X. 11	72	257,1		$79{,}7^0$	$0{,}168_1$		1830 ± 210	
15	30. X. 11			$0{,}164_5$					
20	30. X. 11	72	257,2		$89{,}6^0$	$0{,}168_9$		1400 ± 130	
15	31. X. 11			$0{,}164_7$					
21 A	31. X. 11	71	257,2		$100{,}2^0$	$0{,}169_3$		930 ± 37	
B	30. XI. 11	70	$257{,}3_3$		$100{,}2^0$		$0{,}169_1$		953 ± 60
15	1. XI. 11			$0{,}164_7$					
22 A	1. XI. 11	70	257,2		$110{,}1^0$	$0{,}170_3$		497 ± 9	
B	26. XI. 11	70	257,4		$110{,}1^0$		$0{,}169_3$		483 ± 1
15	3. XI. 11			$0{,}164_7$					
23 A	3. XI. 11	70	257,2		$119{,}9^0$	$0{,}170_9$		256 ± 3	
B	25. XI. 11	70	$257{,}3_3$		$119{,}9^0$		$0{,}170_4$		247 ± 1,4
15	6. XI. 11			$0{,}164_5$					
24 A	7. XI. 11	70	257,2		$129{,}2^0$	$0{,}171_5$		138 ± 3	
B	29. XI. 11	70	$257{,}3_3$		$129{,}6^0$		$0{,}170_8$		138 ± 3
15	8. XI. 11			$0{,}164_5$					
25 A	8. XI. 11	70	$257{,}2_7$		$139{,}1^0$	$0{,}172_0$		79,0 ± 0,6	
B	26. XI. 11	70	257,4		$139{,}5^0$		$0{,}171_8$		77,7 ± 0,7
15	9. XI. 11			$0{,}164_5$					
26 a	9., 10., 12. XI. 11	72	$257{,}2_7$		$149{,}4^0$	$0{,}172_3$		44,50 ± 0,04	
26 b	24. XI. 11	72	$257{,}3_2$		$149{,}4^0$		$0{,}172_0$		45,4 ± 0,08
15	1. XII. 11.			$0{,}164_5$					

(s. Tab. 2, Versuche Nr. 15—19) sehr gut überein, trotzdem inzwischen auch bei höherer Temperatur 115° gemessen wurde; aber auch die bei 79,7° gemessenen Werte vor und nach der Erhitzung auf 110° unterscheiden sich nicht wesentlich: die

Tabelle XII.

Kalkspatplatte II.

Werte von $c_{1\infty}$ und $w_{1\infty}$, gemessen von 149,4° bis 100,2° in Intervallen zu 30° ohne Unterbrechung der Heizung bei $\frac{n}{2\pi} = 257{,}3$

Datum	t^0	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ $10^6\ \Omega$	Verhältnis der $w_{1\infty}$
24. XI. 11	149,4°	$0{,}172_0$	45,4 ± 0,08	5,44
25. XI. 11	119,9°	$0{,}170_4$	247 ± 1,4	für $\Delta t^0 = 29{,}5°$
26. XI. 11	139,5°	$0{,}171_8$	77,7 ± 0,7	6,22
26. XI. 11	110,1°	$0{,}169_3$	483 ± 1	für $\Delta t^0 = 29{,}4°$
29. XI. 11	129,6°	$0{,}170_8$	138 ± 3	6,91
30. XI. 11	100,2°	$0{,}169_1$	953 ± 60	für $\Delta t^0 = 29{,}4°$

Abweichung der Werte für den Widerstand beträgt 2 Proz. bei 1 Proz. Beobachtungsgenauigkeit, und zwar war der Wert nach der Erhitzung kleiner als vor derselben.

Das letztere stimmt auch für die oben erwähnten Abweichungen der Werte $w_{1\infty}$ der Platte II für gleiche Temperaturen vor und nach der Erhitzung: bei den Temperaturen 119,9°, 110,1°, bei denen die Abweichungen der Werte vor und nach der Erhitzung die Beobachtungsgrenzen überschreiten (s. Tab. XI).

Obwohl also weder eine Erhitzung noch eine Abkühlung oder andauerndes Trocknen die innere Leitfähigkeit von Kalkspat wesentlich zu ändern vermag, so scheint doch mit einer vorhergehenden Erhöhung der Leitfähigkeit durch Erhitzung eine Nachwirkung vorhanden zu sein, so wie sie schon von Joffe bei der natürlichen Leitfähigkeit von Quarz gefunden wurde.[1])

In der Tabelle XIII sind für die Kalkspatplatte II die Werte der Kapazität und des Widerstandes bei den Temperaturen von 50°—149,4° zusammengestellt, indem bei den Temperaturen von 100,2°—149,4° von den im Verhältnisse zur

1) A. Joffe, Dissertation München 1905, p. 63.

Änderung mit der Temperatur immerhin geringen Abweichungen zwischen den Werten beider Versuchsreihen A und B der Tabelle XI abgesehen, und für jede Temperatur die Mittel aus diesen Werten genommen wurden. Ferner gibt Tabelle XIII

Tabelle XIII.

Kalkspatplatte II bei $n/2\pi = 257{,}3$.

t^0	$c_1 \infty$ 10^{-3} MF.	$w_1 \infty$ $10^6\ \Omega$	σ_{t^0} $10^{-12} \frac{1}{\Omega\ \mathrm{cm}}$	$\frac{\sigma_{t^0_2}}{\sigma_{t^0_1}}$ ± Proz.	lg σ_{t^0}	diff. lg σ_{t^0}
50,0	$0{,}166_6$	7100	0,6	1,8 ± 40	−0,45	0,57
59,9	$0{,}167_3$	4040	1,1	1,8 ± 25	+0,12	0,58
69,7	$0{,}167_7$	2260	2,0	1,3 ± 26	0,70	0,22
79,7	$0{,}168_1$	1830	2,5	1,3 ± 20	0,92	0,26
89,6	$0{,}168_9$	1400	3,3	1,5 ± 13	1,18	0,40
100,2	$0{,}169_2$	940	4,9	1,94 ± 5	1,58	0,66
110,1	$0{,}169_8$	485	9,4	1,94 ± 2	2,24	0,67
119,9	$0{,}170_6$	250	18,3	1,81 ± 3	2,91	0,59
129,4	$0{,}171_2$	138	33,1	1,76 ± 3	3,50	0,57
139,3	$0{,}171_9$	78,4	58,3	1,74 ± 1	4,07	0,55
149,4	$0{,}172_2$	44,95	101,7		4,62	

die Werte der Leitfähigkeiten (σ_{t^0}) wieder, die in der gleichen Weise wie für die Platte I berechnet wurden, so wie die Verhältnisse derselben für die nahezu gleichen Intervalle von 10^0 zu 10^0.

Bei diesen Werten $\sigma_{t_2}/\sigma_{t_1}$ ist ebenso wie in Tabelle X die relative Genauigkeit in Prozenten angegeben. Den viel kleineren Werten der Leitfähigkeit der Platte II entsprechend, ist auch die Unsicherheit der Werte bei tiefen Temperaturen eine viel größere wie bei Platte I, dagegen ist aber keine störende Vergrößerung der äußeren Leitfähigkeit durch Feuchtigkeit vorhanden, was aus den Werten für den Widerstand bei Zimmertemperatur in der Tabelle 15 am Schlusse zu sehen ist (Kolonne 14). Der kleinste bei Zimmertemperatur beobachtete Wert war etwa 30000 Megohm, oft war der Widerstand bei Zimmertemperatur gar nicht meßbar.

Bei Platte I dagegen (Tab. 1) war der kleinste Wert des Widerstandes bei Zimmertemperatur 1700 Megohm von der Größenordnung der bei der Temperatur 40° und 50° gemessenen Werte.

Die innere Leitfähigkeit bei Zimmertemperatur der Platte I läßt sich daher auch der Größenordnung nach nicht angeben.

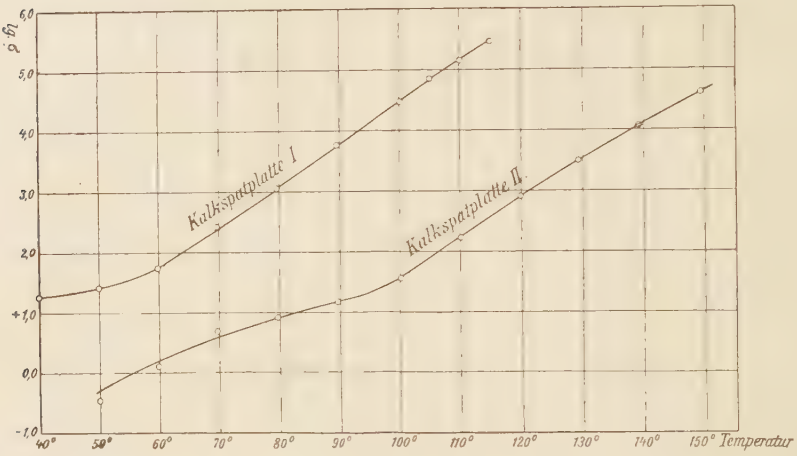

Fig. 4.

Bei der Platte II läßt sich mit Sicherheit nur so viel sagen, daß sie viel kleiner ist als die dem kleinsten Wert des Widerstandes entsprechende Leitfähigkeit $1 \cdot 10^{-13}\,\mathrm{cm}^{-1}/\Omega$. Der größte wahrgenommene Wert $w_{1\infty}$ würde einer Leitfähigkeit von $0{,}8 \cdot 10^{-14}\,\mathrm{cm}^{-1}/\Omega$ entsprechen, der dem von Curie [1]) angegebenen Durchschnittswert für Kalkspat senkrecht zur Achse $0{,}2 \cdot 10^{-14}\,\mathrm{cm}^{-1}/\Omega$ schon nahe kommt.

Wie man aus der Tabelle XIII, in der auch die natürlichen Logarithmen der Leitfähigkeit und die Differenzen angegeben worden sind, sehen kann, wächst auch bei Platte II die Leitfähigkeit von 70°—120° immer rascher mit der Temperatur, dann nimmt die relative Zunahme ab.

Die maximale Änderung findet bei der Platte II zwischen 100° und 120° statt und beträgt 94 Proz. pro 10°.

---

1) J. Curie, Ann. de chim. et phys. 18. p. 203. 1889.

In der Fig. 4 sind die logarithmischen Kurven der Leitfähigkeit für beide Platten aufgetragen. Die Kurve für Platte I zeigt im Gebiete von 60° bis etwa 110° einen von dem geradlinigen sehr wenig abweichenden Verlauf. Zwischen 40° und 60° deutet die sehr scharfe Abbiegung von dem geradlinigen Verlauf auf den Einfluß der äußeren Leitfähigkeit.

Bei der Kurve für Kalkspatplatte II ist der angenähert geradlinige Verlauf auf ein engeres Temperaturintervall beschränkt (100°—130°). Unterhalb 100° läßt sich über den wahrscheinlichsten Verlauf der Kurve wegen der immer geringer werdenden Genauigkeit der Messungen wenig sagen, es scheint aber, daß zwischen 70° und 100° die Kurve zwei Wendepunkte besitzt. Unterhalb 60° scheint die relative Zunahme wieder größer, und zwar zunächst gleich derjenigen, die wir oberhalb 120° haben, zu werden.

Aus dem Vergleiche beider Kurven ergibt sich das auffallende Resultat, daß innerhalb des Gebietes der Leitfähigkeiten, für die die beiden Kurven einen nahezu geradlinigen Verlauf aufweisen, auch beide Kurven nahezu parallel verlaufen, und zwar zwischen den Werten der Ordinaten $\lg \sigma = 1{,}75$ und $\lg \sigma = 3{,}5$. Die mittleren Werte von $d \lg \sigma / dt$ in diesem Gebiete ergeben sich

für Platte I zu 0,0661,
für Platte II zu 0,0674,

weichen also voneinander nur um 2 Proz. ab.

Demnach würde sich der Verlauf der Leitfähigkeit für Platte I im Gebiete von 60°—90° durch die Formel

$$\sigma_{t^0} = \sigma_0 \, e^{0{,}0661\,(t^0 - t_0^0)},$$

für Platte II im Gebiete von 100°—130° durch die Formel

$$\sigma_{t^0} = \sigma_0 \, e^{0{,}0674\,(t^0 - t_0^0)}$$

darstellen lassen.

Würde man nach dieser Formel auf die Zimmertemperatur gleich 20° extrapolieren, so würde sich der Wert

$$\sigma_{20^0} = 2{,}2 \cdot 10^{-14} \, \frac{\mathrm{cm}^{-1}}{\Omega}$$

ergeben, der zwischen den direkt wahrgenommenen $10 \cdot 10^{-14}$ und $0{,}8 \cdot 10^{-14}$ liegt.

Doch ist solche Extrapolation wegen der auf ein bestimmtes Temperaturintervall begrenzte Annäherung an das reine Exponentialgesetz nicht gestattet, vielmehr ist zu vermuten, daß zwischen 20° und 50°, die logarithmische Kurve viel steiler verläuft, da von den direkt beobachteten Werten der Leitfähigkeit bei Zimmertemperatur der kleinere jedenfalls wahrscheinlicher ist. (Vgl. Tab. 15.)

Was die Änderung der Kapazität und mit ihr der Dielektrizitätskonstante anbelangt, so zeigen die Werte $c_{1\infty}$ in den Tabellen IX und XIII, daß die Kapazität und mit ihr die Dielektrizitätskonstante von Kalkspat zunimmt.

Die Änderungen pro 10° sind jedoch zu klein und zeigen wegen der schon früher erwähnten Ungewißheit in der Bestimmung der Kapazität zu unregelmäßige Abweichungen voneinander, daß aus den beobachteten Werten auf irgend ein bestimmtes Gesetz der Abhängigkeit von der Temperatur zu schließen möglich wäre.

Auch wäre es aus diesem Grunde unberechtigt, daß ja die Werte $c_{1\infty}$ jedenfalls nicht die reine elektrostatische Kapazität der Kalkspatplatte darstellen, sondern von Nebenerscheinungen (Polarisation, geschichtetes Dielektrikum), besonders bei höheren Temperaturen begleitet sein müssen, wovon bei der Kleinheit des beobachteten Einflusses der Temperatur nicht abgesehen werden darf.

Die relative Gesamtzunahme der Kapazität von 20° bis 110° beträgt

bei Kalkspatplatte I . . . . . 3,7 Proz.
bei Kalkspatplatte II . . . . . 3,5 Proz.

Von 20° auf 50° ist die relative Zunahme

bei Kalkspatplatte I . . . . . 1,1 Proz.
bei Kalkspatplatte II . . . . . 1,3 Proz.

Von 50° auf 110°

bei Kalkspatplatte I . . . . . 2,6 Proz.
bei Kalkspatplatte II . . . . . 2,2 Proz.

3. Bestrahlungsversuche.

Die Kalkspatplatte II wurde im ganzen vier Bestrahlungen mit X-Strahlen mittlerer Härte unterworfen.

Bei der Bestrahlung war die Platte in eine Aluminiumfolie gewickelt.

Die I. Bestrahlung dauerte eine halbe Stunde, die drei folgenden je dreiviertel Stunden. Nach jeder Bestrahlung wurde so rasch wie möglich mit den Messungen von $c_{1\infty}$ und $w_{1\infty}$ begonnen.

Nach der I. Bestrahlung (Tab. XIV) wurde zuerst bei 21°, dann bei 31° beobachtet.

Tabelle XIV (vgl. Tab. 29).

Kalkspatplatte II nach der I. Bestrahlung bei $n/2\pi = 257{,}4$ und $E_{\text{eff.}} = 72$ Volt.

Zeit nach Bestrahlung	Gemessen bei $t°$	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ $10^6\ \Omega$	$w_{1\infty}$ berechn. für 21°	σ_t $10^{-12}\ \frac{\text{cm}^{-1}}{\Omega}$	σ_t berechn. für 21°
1h 30m	20	$0{,}164_5$	6300	6300	0,7	0,7
24h	21	$0{,}164_5$	5300 ± 700	5300	0,9	0,9
48h	21	$0{,}164_5$	4800 ± 700	4800	1,0	1,0
55h	31	$0{,}165_0$	2600	4700	1,8	1,0
78h	31	$0{,}165_0$	2560 ± 150	4600	1,8	1,0
102h	31	$0{,}165_0$	1750 ± 30	3100	2,6	1,4
126h	31	$0{,}165_0$	1980[1])	—	—	—
150h	31	$0{,}165_1$	1905 ± 5	3400	2,4	1,3
42 Tage	20	$0{,}164_5$	9300 ± 2000	9300	0,5	0,5

Es zeigt sich eine starke Zunahme der Leitfähigkeit durch X-Strahlen hervorgerufen, während die Kapazität unbeeinflußt bleibt.

In der letzten Kolonne sind zur besseren Orientierung die Werte von σ_{t° angegeben, die, mit Ausnahme der drei ersten bei Zimmertemperatur gemessenen, aus den Werten bei 31° auf die Temperatur 21° umgerechnet worden sind; dies geschah unter der Voraussetzung, die natürlich in sehr grober Näherung gilt, daß in kleinen Zeiten sich die Leitfähigkeit

1) Diese Messung fällt aus, da die Einstellung sehr ungenau war (vgl. Tab. 29).

nach dem Exponentialgesetz ändert. Die Berechnung war wie folgt:

In 24^h ist der Widerstand um

$$\frac{5300}{4800} = 1{,}1$$

gesunken, also gilt für den Widerstand zur Zeit 55^h nach der Bestrahlung, d. h. 7^h später

$$\lg (1 + x)^7 = \frac{7}{24} \lg 1{,}1$$

und

$$(1 + x)^7 = 1{,}03;$$

also berechnet sich für 21^0 der Wert 4700 Megohm, während tatsächlich 2600 Megohm bei 31^0 gemessen wurde.

Demnach wäre der Temperaturkoeffizient

$$\frac{w_{21^0}}{w_{31^0}} = 1{,}8\,^1),$$

der der Umrechnung auf 21^0 zugrunde gelegt wurde. Aus den Werten für σ_{t^0} bei 21^0 zeigt sich, daß die Leitfähigkeit nach der I. Bestrahlung mit einem Werte einsetzt, der gleich ist demjenigen der natürlichen Leitfähigkeit der Kalkspatplatte II bei 50^0. Sie steigt dann allmählich an bis auf den doppelten Wert (gemessen wurde der Wert $2{,}6 \cdot 10^{-12}\,\mathrm{cm}^{-1}/\Omega$ bei 31^0, der der natürlichen Leitfähigkeit bei 80^0 entspricht), um dann wieder abzunehmen.

Nach 42 Tagen ist die Leitfähigkeit bei 20^0 auf etwa $^2/_3$ des Anfangswertes nach der Bestrahlung gesunken. Der Einfluß der Bestrahlung nimmt also bei Zimmertemperatur sehr langsam ab.

Mit diesem Werte der Leitfähigkeit wurde die Platte abermals bestrahlt (Tab. XV und Fig. 5) und dann bei Zimmertemperatur beobachtet.

Es zeigt sich nun, daß 1. der Anfangswert (1 Stunde nach der II. Bestrahlung) größer ist, wie nach der I. Bestrahlung und gleich der Summe aus der restierenden Leitfähigkeit vor der II. Bestrahlung und dem Anfangswert nach der I. Bestrahlung; 2. tritt das Maximum schon nach 28 Stunden ein;

1) Dieser Temperaturkoeffizient gewinnt an Wahrscheinlichkeit, wenn man bemerkt, daß bei gleich großer natürlicher Leitfähigkeit derselbe Temperaturkoeffizient gewonnen wurde.

Tabelle XV (vgl. Tab. 30).

Kalkspatplatte II nach der II. Bestrahlung.
$c_1 \infty = 0{,}164_5 \cdot 10^{-3}$ MF.; $n/2\pi = 257{,}5$; $E_{\text{eff.}} = 72$ Volt.

Zeit nach der Bestrahlung	t^0	$w_1 \infty$ $10^6\ \Omega$ ± Proz.	σ $10^{-12}\,\text{cm}^{-1}/\Omega$	$\frac{\sigma_{n+1}}{\sigma_n}$	lg σ	lg σ
1 h	20	3740 ± 9	1,22		0,199	
				$1{,}4_2$		$0{,}34_9$
28	20	2640 ± 20	1,73		0,548	
				$0{,}9_6$		$-\ 0{,}04_1$
52	20	2750 ± 22	1,66		0,507	
				$0{,}7_1$		$-\ 0{,}33_1$
79	20	3850 ± 16	1,19		0,176	
				$1{,}0_1$		$+\ 0{,}00_6$
126	21	3790 ± 20	$1{,}2_0$		0,182	
				$0{,}5_5$		$-\ 0{,}59_8$
198	21	6890 ± 10	$0{,}6_6$		− 0,416	
				$0{,}6_8$		− 0,38
263	20	10100 ± 14	$0{,}4_5$		− 0,80	
				$1{,}0_0$		− 0,00
383	20	10130 ± 14	$0{,}4_5$		− 0,80	
				$0{,}7_1$		− 0,34
509	20	14300 ± 13	$0{,}3_2$		− 1,14	

3 ist nach 500 Stunden ein kleinerer Wert der Leitfähigkeit vorhanden, als nach 1000 Stunden nach der I. Bestrahlung.

Kalkspatplatte II nach der II. Bestrahlung bei Zimmertemperatur.

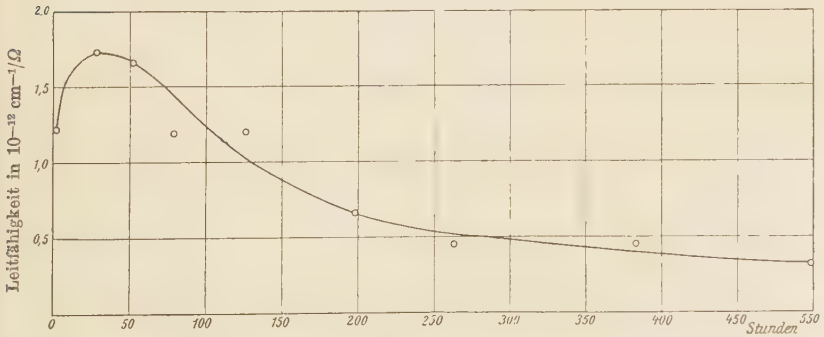

Fig. 5.

Das Maximum entspricht dem Werte der natürlichen Leitfähigkeit bei 68°.

Um zu sehen, wie sich der Einfluß der Bestrahlung bei gleichzeitiger Temperaturerhöhung darstellt, wurde die Platte

Tabelle XVI (vgl. Tab. 31.)

Kalkspatplatte II nach der III. Bestrahlung.
$t^0 = 110{,}1^0$; $n\,2\pi = 257{,}4$; $E_{\text{eff.}} = 72$ Volt.

Zeit nach der Bestrahlung	$c_1 \infty$ 10^{-8} MF.	$w_1 \infty$ $10^6\ \Omega$	σ $10^{-12}\,\frac{\text{cm}^{-1}}{\Omega}$	$\frac{\sigma_{n+1}}{\sigma_n}$	lg σ	diff. lg σ
5h 15m	$0{,}170_1$	83,1 ± 1,5	55,0		4,01	
				0,82		0,20
26 50	$0{,}170_2$	101,8	44,9		3,81	
				0,98		0,03
33 40	$0{,}170_2$	104,3 ± 1,0	43,8		3,78	
				0,92		0,08
54 8	$0{,}170_3$	113,5 ± 0,8	40,3		3,70	
				0,89		0,11
77 25	$0{,}170_0$	127,0 ± 2,2	36,0		3,59	
				0,93		0,07
100 00	$0{,}169_8$	136,1 ± 1,0	33,6		3,52	
				0,91		0,10
124 30	$0{,}170_0$	149,8 ± 2,3	30,5		3,42	
				0,88		0,13
194 40	$0{,}170_3$	170,2 ± 2,0	26,8		3,29	
				0,95		0,05
244 10	$0{,}170_0$	179,1 ± 2,8	25,5		3,24	
				0,94		0,07
312 20	$0{,}170_1$	191,2 ± 3,1	23,9		3,17	
				0,96		0,03
414 5	$0{,}170_1$	198,8 ± 2,7	23,0		3,14	

unmittelbar nach der III. Bestrahlung auf die Temperatur 110,1° gebracht und beobachtet. (Tab. XVI und Fig. 6.)

Fünf Stunden nach der Bestrahlung war eine Leitfähigkeit vorhanden, die der natürlichen bei 138° entspricht und sechsmal so groß ist, wie die natürliche bei derselben Temperatur.

Es war leider wegen der Einregulierung der Temperatur des Ofens nicht möglich, eher mit den Beobachtungen zu beginnen. — Es läßt sich also nicht bestimmt sagen, ob das Maximum der Leitfähigkeit überhaupt verschwindet oder sehr

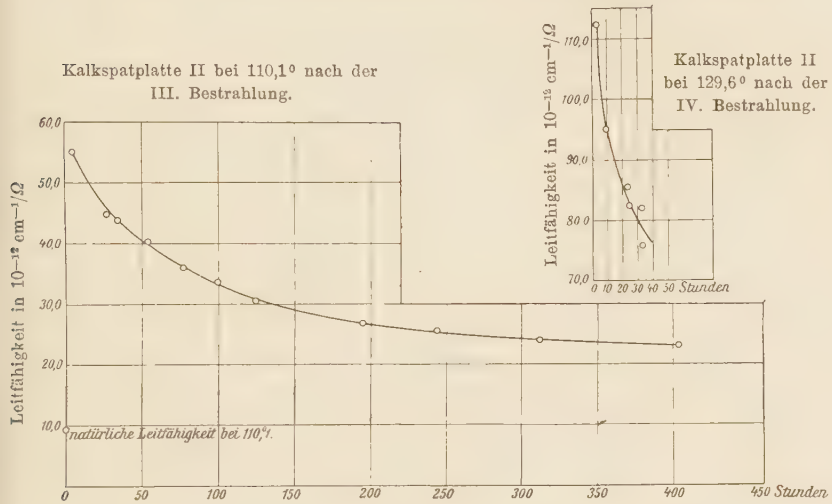

Fig. 6.

viel näher an die Zeit Null gerückt ist. Jedenfalls aber nach fünf Stunden haben wir es mit einer reinen Abklingungskurve zu tun.

Der Wert der Kapazität $c_{1\infty}$ weist keine wesentliche Änderung gegen den bei derselben Temperatur vor den Bestrahlungsversuchen gemessenen auf und verändert sich nicht während des Abklingens der Leitfähigkeit.

Um Aufschluß darüber zu erhalten, ob bei der von X-Strahlen beeinflußten Platte der Einfluß der Frequenz auf die Größen $c_{1\infty}$ und $w_{1\infty}$ derselbe geblieben ist, wurde am Tage nach der III. Bestrahlung bei zwei verschiedenen Schwingungsstrahlen 257,5 und 126,7 gemessen.

Diese Versuche waren dadurch sehr erschwert, daß, um vergleichbare Werte zu erhalten, wegen des Abklingens sehr rasch hintereinander beobachtet werden mußte, in Ermangelung aber eines zweiten Vibrationsgalvanometers die zweifache Umstimmung des einen immerhin eine gewisse Zeit erforderte.

Die Resultate dieser Messungsreihe sind in Tabelle XVII wiedergegeben. Sie stehen im Widerspruch mit den früheren, über den Einfluß der Frequenz erhaltenen, da sie mit ab-

Tabelle XVII (vgl. Tab. 31).

Kalkspatplatte II nach der III. Bestrahlung.
Einfluß der Frequenz.
$t^0 = 110{,}1^0$; $E_{\text{eff.}} = 72$ Volt.

Zeit nach Bestrahlung	$\frac{n}{2\pi}$	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ $10^6\ \Omega$	$c_{1\infty}\ w_{1\infty}$
26h 50m	257,6	$0{,}170_2$	101,8	17,33
30 00	126,7	$0{,}169_7$	104,7	17,75
30 55	126,7	$0{,}169_9$	106,1	18,00
33 20	257,4	$0{,}170_2$	103,3	17,58
34 00	257,4	$0{,}170_2$	105,3	17,93
Mittel für 33h 40m	257,4	$0{,}170_2$	104,3	17,75
Hieraus berechnet sich für:				
30h 30m	126,7	$0{,}169_8$	105,4	17,88
30 15	257,5	$0{,}170_2$	103,1	17,54

nehmender Frequenz eine Zunahme statt einer Abnahme des Widerstandes $w_{1\infty}$ aufweisen.

Hierzu ist zu bemerken, daß bei dieser letzten Messungsreihe die Kalkspatplatte II eine nicht unwesentlich kleinere Leitfähigkeit besaß, als bei den soeben erwähnten Versuchen über den Einfluß der Frequenz, die an der noch unbestrahlten Platte vorgenommen wurden (s. Tab. VII auf p. 42 und Tab. VIII auf p. 43). Auch war die Temperatur niedriger: 110^0 statt 149^0 resp. 139^0.

Um nun festzustellen, ob auch bei höherer Temperatur und größerer Leitfähigkeit nach einer Bestrahlung der Einfluß der Frequenz auf die Werte $c_{1\infty}$ und $w_{1\infty}$ ein entgegengesetzter

ist, wie bei unbestrahlter Platte, wurde die Kalkspatplatte II nochmals, zum viertenmal, bestrahlt und dann bei der Temperatur 129,6° beobachtet. Die Messungen bei zwei verschiedenen Frequenzen wurden am Tage nach der Bestrahlung ausgeführt, sie sind in der Tab. XVIII wiedergegeben. Auf zwei Ver-

Tabelle XVIII (vgl. Tab. 32).

Kalkspatplatte nach der IV. Bestrahlung.
$t^0 = 129{,}6^0$; $E_{\text{eff.}} = 72$ Volt.

Versuch Nr.	Zeit nach Bestrahlung	$\frac{n}{2\pi}$	$c_1\infty$ 10^{-3} MF.	$w_1\infty$ $10^6\ \Omega$	$c_1\infty\ w_1\infty$	σ $10^{-12}\ \frac{\text{cm}^{-1}}{\Omega}$
1	3h 28m	257,5	$0{,}171_2$	$40{,}6_3$	—	112,4
2	9 38	257,5	$0{,}171_5$	$47{,}9_5$	—	95,2
3	23 48	257,5	$0{,}171_7$	53,3	$9{,}15_2$	85,7
4	24 33	257,5	$0{,}171_8$	55,4	$9{,}51_8$	82,5
5	28 3	126,5	$0{,}171_2$	55,6	$9{,}51_9$	—
6	28 58	126,4	$0{,}171_6$	55,3	$9{,}49_0$	—
7	32 43	257,4	$0{,}171_8$	55,7	$9{,}56_9$	82,0
8	33 23	257,4	$0{,}171_9$	60,2	10,35	75,9

Zusammenstellung der Mittelwerte:

aus						
4 u. 7	28h 38m	$257{,}4_5$	$0{,}171_8$	$55{,}5_5$	$9{,}54_4$	—
5 u. 6	28 30	$126{,}4_5$	$0{,}171_4$	$55{,}4_5$	$9{,}50_5$	—
aus						
3 u. 8	28 35	$257{,}4_5$	$0{,}171_8$	$56{,}7_5$	9,75	—
5 u. 6	28 30	$126{,}4_5$	$0{,}171_4$	$55{,}4_5$	$9{,}50_5$	—
aus						
(3) u. (7) / (4) u. (8)	28 36	$257{,}4_5$	$0{,}171_8$	$56{,}1_5$	9,65	—
5 u. 6	28 30	$126{,}4_5$	$0{,}171_4$	$55{,}4_5$	$9{,}50_5$	—

suche bei $n/2\pi = 257{,}5$ folgten zwei Versuche bei $n/2\pi = 126{,}45$ und so rasch wie möglich danach abermals zwei Versuche bei $n/2\pi = 257{,}5$.

Aus Tab. XVIII sieht man, daß, wie man auch die Mittelwerte aus den zugehörigen Werten bilden mag, sich immer der gleiche Einfluß von der Frequenz zeigt, wie der vor den

Bestrahlungsversuchen beobachtete: eine Abnahme des Widerstandes $w_{1\infty}$ mit abnehmender Frequenz, während $c_{1\infty}$ keine wesentliche Änderung erfährt. — Tab. XVIII zeigt weiter, daß die Leitfähigkeit der Kalkspatplatte II in diesem Falle zwischen denjenigen Werten lag, die bei den Versuchen der Tab. VII und VIII vorhanden waren.

In der Figur 6 ist der Verlauf der Leitfähigkeit am ersten Tage nach der IV. Bestrahlung ebenfalls graphisch dargestellt. Die Kurve zeigt kein Maximum und verläuft bei der Temperatur 129,6° viel steiler wie diejenige bei 110,1° nach der III. Bestrahlung. — Der Anfangswert der Leitfähigkeit ($3^1/_2$ Stunden nach der Bestrahlung) entspricht der natürlichen Leitfähigkeit bei 152° und ist ca. $3^1/_2$ mal so groß wie diejenige bei derselben Temperatur 129,6° vor den Bestrahlungsversuchen.

Der Wert der Kapazität $c_{1\infty}$ ist anfangs der gleiche wie vor den Bestrahlungsversuchen bei derselben Temperatur, dann nimmt er etwas zu.

§ 7. Diskussion der Versuchsresultate.

Es sei hier zunächst der Einfluß der Frequenz auf die Größen $c_{1\infty}$ und $w_{1\infty}$ besprochen.

Die Versuche mit den beiden nichtbestrahlten Kalkspatplatten haben sämtlich ergeben, daß der scheinbare Widerstand $w_{1\infty}$ mit abnehmender Frequenz abnimmt, ebenso das Produkt $c_{1\infty}\, w_{1\infty}$. — Was die Kapazität $c_{1\infty}$ betrifft, so hat sich kein wesentlicher Einfluß der Frequenz auf den Wert derselben feststellen lassen; hier sei noch einmal auf den Umstand hingewiesen, der schon öfters erwähnt wurde, daß bei der benutzten Methode die Messung der Kapazität wegen der Kleinheit derselben weniger zuverlässig erscheint, als diejenige des Widerstandes, was besonders deutlich bei den Versuchen über die Abhängigkeit von der Temperatur an der Kalkspatplatte II hervortritt (vgl. Tab. XI auf p. 40). Wir müssen also bei der Diskussion des Einflusses der Frequenz unser Hauptaugenmerk auf die Werte von $w_{1\infty}$ und des Produktes $c_{1\infty}\, w_{1\infty}$, das sich unabhängig von den Kapazitätseinstellungen aus den übrigen Versuchsdaten berechnen läßt, lenken.

Fragen wir nach den möglichen Ursachen einer Änderung des scheinbaren Widerstandes und scheinbarer Kapazität mit der Frequenz überhaupt, so können deren vier angegeben werden.

Es sind das 1. die Erscheinung des elektrischen Rückstandes in Dielektriken; 2. die sogenannte „viskose" Hysterese in denselben; 3. eine Inhomogenität des Dielektrikums im Sinne Maxwells, welche auch den Fall der schlechtleitenden Schichten umfaßt; 4. die Existenz einer galvanischen Polarisation, von der in der Einleitung (vgl. S. 7 und 8) die Rede war.

Die Fälle (1) und (2) hat E. v. Schweidler[1]) behandelt. — Der elektrische Rückstand hat nach v. Schweidler ganz allgemein die Wirkung, daß mit abnehmender Schwingungszahl der scheinbare Widerstand zunimmt, die Kapazität ebenso.[2])

Einen gleichen Einfluß der Frequenz auf die scheinbaren Werte des Widerstandes und der Kapazität müssen wir nach v. Schweidler auch für den Fall der „viskösen" Hysterese erhalten.[3])

Für den Fall (3) eines geschichteten Dielektrikums haben wir bereits im § 2 die Formeln (7) und (8) (vgl. p. 16) abgeleitet.

Speziell für den scheinbaren Widerstand haben wir die Formel

$$w_{1\infty} = w_1 \left(1 + \frac{c_1}{C}\right)^2 + \frac{1}{n^2 C^2 w_1}.$$

C ist nun die Kapazität der schlechtleitenden Schicht. Haben wir es mit einer durch eine bereits vorhandene Inhomogenität bedingten Schicht zu tun, so ist dann C unabhängig von der Frequenz, und hieraus folgt für eine nicht zu dünne Schicht, daß mit abnehmender Frequenz der scheinbare Widerstand zunehmen muß.

Eine Formierung, d. h. Bildung von schlecht leitenden Schichten im Kalkspat mit Wechselstrom scheint sehr unwahrscheinlich[4]); jedenfalls würden solche Schichten infolge ihrer äußerst geringen Dicke so große Werte von C ergeben, daß

1) E. v. Schweidler, Ann. d. Phys. 24. p. 711. 1907.
2) l. c. p. 723.
3) l. c. p. 742.
4) G. Schultze, l. c. p. 454.

die in Formel (8) für $w_1\infty$ in Frage kommenden Korrektionsglieder ohne merklichen Einfluß auf $w_1\infty$ sein würden, so daß dann merklich $w_1\infty = w_1$ wäre und ein Einfluß der Frequenz überhaupt nicht vorhanden sein könnte.

Aus dem bisher Gesagten sieht man, daß als Ursache des bei den Kalkspatplatten beobachteten Einflusses der Frequenz auf den scheinbaren Widerstand $w_1\infty$ weder elektrischer Rückstand noch „viskose" Hysterese oder eine Inhomogenität des Dielektrikums betrachtet werden können.

Es bleibt also nur noch die vierte mögliche Ursache, d. h. die Existenz einer galvanischen Polarisation im Kalkspat zu erwägen.

Im § 2 haben wir, ausgehend von dem M. Wienschen Ansatze für ein Dielektrikum mit galvanischer Polarisation,

$$a_1 = \frac{w_1}{1 + i\,n\,c_1\,w_1} + \frac{1}{i\,n\,C}$$

die Formeln (7) und (8) abgeleitet.

Dieser Widerstandsoperator entspricht dem Kohlrauschschen Ansatze für die Polarisationsspannung

$$p = \frac{a}{nC}\left(nt - \frac{\pi}{2}\right).$$

Es wird also angenommen, daß die elektromotorische Kraft der Polarisation und der polarisierende Strom in der Phase um $\pi/2$ gegeneinander verschoben sind.

Wie es aber M. Wien,[1]) Orlich,[2]) E. Neumann[3]) und Krüger[4]) experimentell, Warburg[5]) und Krüger[6]) theoretisch gezeigt haben, ist der obige ursprüngliche Kohlrauschsche Ansatz durch den allgemeinen

$$p = \frac{a}{nC}\left(nt - \left(\frac{\pi}{2} - \vartheta\right)\right)$$

zu ersetzen, wo die Phasenverschiebung ϑ Werte von 0 bis $\pi/2$ annehmen kann.

---

1) M. Wien, Wied. Ann. **58.** p. 37. 1896 u. Ann. d. Phys. **8.** p. 372. 1902.

2) E. Orlich, Diss. Berlin 1896.

3) E. Neumann, Wied. Ann. **67.** p. 500. 1899.

4) F. Krüger, Ztschr. für phys. Chemie **45.** p. 1. 1903.

5) E. Warburg, Wied. Ann. **67.** p. 493. 1899.

6) F. Krüger, l. c.

Diesem erweiterten Ansatze entspricht für ein Dielektrikum mit galvanischer Polarisation der Widerstandsoperator

$$a_1 = \frac{w_1}{1 + i n c_1 w_1} + r + \frac{1}{i n C},$$

wobei $n C r = \operatorname{tg} \vartheta$ ist. Die Größe r entspricht der von M. Wien[1]) an flüssigen Elektrolyten bei Wechselstrom beobachteten Widerstandsvermehrung Δw. Wir haben also jetzt für die Größen $w_{1\infty}$ und $c_{1\infty}$

$$\frac{w_{1\infty}}{1 + i n c_{1\infty} w_{1\infty}} = \frac{w_1}{1 + i n c_1 w_1} + r + \frac{1}{i n C}$$

statt der auf p. 15 benutzten Gleichung und wir erhalten an Stelle der Formeln (7) und (8) auf p. 16 für $c_{1\infty}$ und $w_{1\infty}$

$$w_{1\infty} = w_1 \left[\left(1 + \frac{c_1}{C}\right)^2 \frac{\left[1 + \dfrac{\operatorname{tg} \vartheta}{n C w_1 \left(1 + \dfrac{c_1}{C}\right)}\right]^2}{1 + \dfrac{\operatorname{tg} \vartheta}{n C w_1} (1 + n^2 c_1^2 w_1^2)} + \frac{1 - n c_1 w_1 \operatorname{tg} \vartheta}{n^2 C^2 w_1^2 \left[1 + \dfrac{\operatorname{tg} \vartheta}{n C w_1} (1 + n^2 c_1^2 w_1^2)\right]} \right]$$

$$c_{1\infty} = \frac{c_1}{\left(1 + \dfrac{c_1}{C}\right)(1 - n c_1 w_1 \operatorname{tg} \vartheta)} \cdot \frac{1 + \dfrac{1}{n^2 C c_1 w_1^2 \left(1 + \dfrac{c_1}{C}\right)} - \dfrac{c_1}{C} \dfrac{\operatorname{tg} \vartheta}{1 + \dfrac{c_1}{C}} \left[n C w_1 \left(1 + \dfrac{c_1}{C}\right) + \operatorname{tg} \vartheta \right]}{\left[1 + \dfrac{\operatorname{tg} \vartheta}{n C w_1 \left(1 + \dfrac{c_1}{C}\right)}\right]^2 + \dfrac{1 - n c_1 w_1 \operatorname{tg} \vartheta}{n^2 C^2 w_1^2 \left(1 + \dfrac{c_1}{C}\right)^2}}.$$

Also sind jetzt die aus den Versuchsdaten zu berechnenden Größen $c_{1\infty}$ und $w_{1\infty}$ Funktionen von vier Unbekannten c_1, w_1, C und ϑ.

Nun hat Krüger[2]) eine Theorie der Polarisationskapazität für flüssige Elektrolyte entwickelt, nach der wir in bezug auf die Abhängigkeit der Polarisationskapazität von der Frequenz und die Phasenverschiebung folgende drei Fälle unterscheiden müssen:

1) M. Wien, Wied. Ann. 58. p. 37. 1896.
2) F. Krüger, l. c. p. 74.

a) „Bei geringer Ionenkonzentration eines völlig dissoziierten Elektrolyten bzw. bei geringer Gesamtkonzentration eines wenig dissoziierten wird die Polarisationskapazität nur durch die von der Schwingungsdauer unabhängige Doppelschichtenkapazität dargestellt. Die Phasenverschiebung ist gleich Null oder wenigstens klein. . . .

b) Bei mäßiger Konzentration und völliger Dissoziation, angenähert auch bei geringer Dissoziation wird die Kapazität wesentlich nur durch Diffusion bedingt. Hier haben wir die Warburgsche Theorie für sogenannte umkehrbare Elektroden mit ihren Gesetzen. Die Kapazität ist umgekehrt proportional $\sqrt{n}$, Phasenverschiebung $\vartheta = \pi/4$.

c) Bei hoher Konzentration eines wenig dissoziierten Elektrolyten wirkt nur noch der Einfluß der endlichen Dissoziationsgeschwindigkeit. In diesem Gebiet ist die Kapazität umgekehrt proportional n und $\vartheta = \pi/2$.“

Zwischen diesen drei Hauptfällen können alle möglichen Übergangsfälle liegen.

Ehe wir diese Resultate der Krügerschen Theorie auf unsere obigen Formeln anwenden, müssen wir den Umstand berücksichtigen, daß, falls wir Kalkspat als eine feste Lösung betrachten wollen, wir es jedenfalls dem geringen Leitungsvermögen entsprechend mit einer geringen Ionenkonzentration zu tun haben und daß andererseits keine völlige Dissoziation vorhanden ist, wofür die Erhöhung des Leitungsvermögens durch die X-Strahlen spricht.

Dementsprechend haben wir es vermutlich im Falle des Kalkspates als feste Lösung entweder mit dem Krügerschen Falle (a) selbst oder mit einem zwischen die Fälle (a) und (b), jedoch näher an den ersteren kommenden Falle zu tun.

Im Falle (a) selbst ist $\operatorname{tg}\vartheta = 0$. Wir erhalten dann für $c_1\infty$ und $w_1\infty$ unsere früheren Formeln (7) und (8) und da C unabhängig von der Frequenz sein soll, einen analogen Einfluß der Frequenz auf die Größen $c_1\infty$ und $w_1\infty$, wie in dem schon betrachteten Falle eines geschichteten Dielektrikums.

Setzen wir aber $\operatorname{tg}\vartheta$ nicht gleich Null, sondern klein voraus und C abhängig von der Schwingungszahl, z. B. entsprechend dem Falle (b) von Krüger $C = k/\sqrt{n}$ und berücksichtigen, daß $n^2 C^2 w_1^2$ im Falle von Kalkspat wegen des hohen Widerstandes

w_1 groß gegen 1 ist, so erhalten wir näherungsweise für $w_{1\infty}$ den Ausdruck

$$w_{1\infty} = w_1 \left(1 + \frac{c_1}{C}\right)^2 \frac{\left(1 + \dfrac{\operatorname{tg} \vartheta}{n\, C\, w_1 \left(1 + \dfrac{c_1}{C}\right)}\right)^2}{1 + \dfrac{\operatorname{tg} \vartheta}{n\, C\, w_1} (1 + n^2\, c_1^2\, w_1^2)}.$$

Im gewöhnlichen Falle eines flüssigen Elektrolyten ist der Faktor $1 + \frac{c_1}{C}$ und um so mehr das Quadrat desselben zu vernachlässigen wegen der Kleinheit des Verhältnisses c_1 / C. Denken wir uns aber mit steigender Polarisation C hinreichend klein, so kann es kommen, daß für den Einfluß der Frequenz der Faktor

$$\left(1 + \frac{c_1}{C}\right)^2$$

in den Vordergrund tritt.

Es wird aber dann bei hinreichend kleinem ϑ mit abnehmender Frequenz der scheinbare Widerstand abnehmen müssen, wie es bei den vorliegenden Versuchen der Fall war.

Um sich darüber orientieren zu können, wie groß bei gegebener Phasenverschiebung ϑ die Polarisationskapazität sein müßte, um den beobachteten Einfluß der Frequenz auf den scheinbaren Widerstand $w_{1\infty}$ zu ergeben, wollen wir die Rechnung an einem Zahlenbeispiel, das den in den Versuchen gegebenen Verhältnissen möglichst nahe kommt, durchführen. Zu dem Zweck setzen wir voraus, daß das Verhältnis c_1 / C klein gegen 1 bleibt, so daß wir vereinfachend schreiben können

$$\frac{w_{1\infty}}{w_1} = \frac{1 + \dfrac{2\, c_1}{C} + \dfrac{2 \operatorname{tg} \vartheta}{n\, C\, w_1}}{1 + \dfrac{\operatorname{tg} \vartheta}{n\, C\, w_1} (1 + n^2\, c_1^2\, w_1^2)}.$$

Seien nun $(w_{1\infty})_{2n}$ und $(w_{1\infty})_n$ die bei den Frequenzen $2\,n$ und n beobachteten scheinbaren Widerstände.

Es ist dann

$$C_{2n} = \frac{k}{\sqrt{2\,n}} \quad \text{und} \quad C_n = \frac{k}{\sqrt{n}},$$

also ist für das Verhältnis

$$\alpha = \frac{\frac{(w_1\infty)_{2n}}{(w_1\infty)_n} = \left(k + 2\sqrt{2}\sqrt{n}\,c_1 + \frac{2}{\sqrt{2}\sqrt{n}}\frac{\operatorname{tg}\vartheta}{w_1}\right)\left[k + \frac{\operatorname{tg}\vartheta}{\sqrt{n}\,w_1}(1 + n^2 c_1^2 w_1^2)\right]}{\left(k + 2\sqrt{n}\,c_1 + \frac{2\operatorname{tg}\vartheta}{\sqrt{n}\,w_1}\right)\left[k + \frac{\operatorname{tg}\vartheta}{\sqrt{2}\sqrt{n}\,w_1}(1 + 4n^2 c_1^2 w_1^2)\right]}.$$

Hieraus ergibt sich die quadratische Gleichung für k

$$\begin{aligned}\sqrt{2n}\,w_1(\alpha - 1)k^2 + \{&2\sqrt{2}\,n\,c_1 w_1(\alpha - \sqrt{2})\\ &+ \operatorname{tg}\vartheta[\alpha(2\sqrt{2}+1) - (2+\sqrt{2})\\ &+ n^2 c_1^2 w_1^2(4\alpha - \sqrt{2})]\}k\\ &+ \frac{2\operatorname{tg}\vartheta}{\sqrt{n}\,w_1}\{\alpha(1 + 4n^2 c_1^2 w_1^2)(n\,c_1 w_1 + \operatorname{tg}\vartheta)\\ &- (1 + n^2 c_1^2 w_1^2)(2n\,c_1 w_1 + \operatorname{tg}\vartheta)\} = 0.\end{aligned}$$

Setzen wir jetzt entsprechend den Versuchen der Tab. VII mit Kalkspatplatte II:

$$\alpha = 1{,}05;\quad n/2\pi = 128 \sim n = 0{,}805\cdot 10^3;$$
$$c_1 = 1{,}6\cdot 10^{-10}\,\mathrm{F}. \qquad w_1 = 4\cdot 10^7\,\Omega,$$

so erhalten wir für k die Gleichung:

$$\begin{aligned}8{,}02\cdot 10^7 k^2 + \{&74{,}6\operatorname{tg}\vartheta - 5{,}25\}k + 5{,}21\cdot 10^{-7}\operatorname{tg}\vartheta\\ &+ 1{,}49\cdot 10^{-7}\operatorname{tg}^2\vartheta = 0,\end{aligned}$$

woraus

$$k = \frac{5{,}25 - 74{,}6\operatorname{tg}\vartheta \pm \sqrt{5512\operatorname{tg}^2\vartheta - 950\operatorname{tg}\vartheta + 27{,}5}}{16{,}04\cdot 10^7}.$$

Sei jetzt ϑ klein, z. B. $\operatorname{tg}\vartheta = 0{,}01$, so ist

$$k_1 = 12\cdot 10^{-10} \quad \text{und} \quad k_2 = 550\cdot 10^{-10};$$

von diesen beiden Werten berücksichtigen wir, da nach Voraussetzung c_1/C klein gegen 1 sein soll, nur den größeren und es ist also

$$C_{256} = \frac{k_2}{\sqrt{2n}} = \frac{550}{40{,}1}10^{-10}\,\mathrm{F}. \quad C_{128} = \frac{k_2}{\sqrt{n}} = \frac{550}{28{,}4}10^{-10}\,\mathrm{F}.$$

oder

$$C_{256} = 1{,}4\cdot 10^{-3}\,\mathrm{MF}. \quad \text{und} \quad C_{128} = 2\cdot 10^{-3}\,\mathrm{MF}.$$

Diese Orientierungsrechnung zeigt also, daß man, um einen Einfluß der Frequenz auf den scheinbaren Widerstand $w_1\infty$ von der Richtung und Größe des beobachteten zu er-

halten, Polarisationskapazitäten von der Größenordnung einiger Tausendstel Mikrofarad annehmen muß, während bei flüssigen Elektrolyten die Polarisationskapazität nach Mikrofarads gemessen wird. Dies würde auch ein Maß für die Stärke der Polarisation geben, die man bei Kalkspat anzunehmen geführt wird und was im Einklang mit der von Röntgen[1]) festgestellten Tatsache ist, daß die Polarisationsspannung bei Kalkspat unter Umständen Tausende von Volts betragen kann.

Was den Einfluß der Frequenz auf die scheinbare Kapazität $c_{1\infty}$ anbelangt, so ergibt die Formel für den soeben betrachteten Fall, daß $\operatorname{tg}\vartheta = 0{,}01$ und $k = 550 \cdot 10^{-10}$ ist, eine Zunahme der Kapazität mit abnehmender Frequenz und zwar berechnet sich diese Zunahme für die Schwingungszahlen 128 und 256 zu 3 Proz., die Versuche aber haben keinen wesentlichen Einfluß und eher eine innerhalb der Fehlergrenzen bleibende Abnahme mit abnehmender Frequenz ergeben.

Hier ist also eine Diskrepanz zwischen den Versuchsergebnissen und den Forderungen der Formeln vorhanden.

Dieselbe läßt sich zum Teil durch die am Anfang dieses Paragraphen betonte Ungewißheit in der Bestimmung der Kapazität erklären; dann ist auch zu bemerken, daß sehr wahrscheinlich die Abhängigkeit der Polarisationskapazität C für kleinere Werte der Phasenverschiebung eine andere und nicht die in unserem Zahlenbeispiel angenommene sein wird. Für kleinere ϑ wird C vermutlich langsamer als mit $1/\sqrt{n}$ zunehmen. Schließlich kommt noch in Betracht, daß eine Theorie, die sich auf die bei flüssigen und insbesondere wässerigen Elektrolyten beobachteten Polarisationserscheinungen stützt, nicht ohne weiteres auf feste Lösungen übertragen werden darf.

Über Konzentration, Diffusion und Dissoziation einer solchen Lösung läßt sich zurzeit wenig Bestimmtes aussagen.

Was nun die nach der III. und IV. Bestrahlung über den Einfluß der Frequenz auf $c_{1\infty}$ und $w_{1\infty}$ unternommenen Versuche (vgl. Tab. XVII p. 60 und Tab. XVIII p. 61) betrifft, so hat sich bei diesen Versuchen ein entgegengesetzter Einfluß auf $w_{1\infty}$ ergeben.

Nach der III. Bestrahlung bei 110,1° wurde mit abneh-

1) W. C. Röntgen, l. c.

mender Frequenz eine Zunahme des Widerstandes $w_1\infty$ beobachtet, während nach der IV. Bestrahlung bei 129,6° ein Einfluß in demselben Sinne festgestellt wurde, wie bei der unbestrahlten Kalkspatplatte, d. h. mit abnehmender Frequenz eine Abnahme des Widerstandes.

In diesem letzten Falle hatte die Platte eine Leitfähigkeit, deren Wert zwischen denjenigen liegt, die bei den Versuchen über den Einfluß der Frequenz an der unbestrahlten Platte vorhanden waren (vgl. p. 62): bei den Versuchen nach der III. Bestrahlung war der Widerstand wesentlich höher. Aus den beiden Versuchsreihen an der unbestrahlten Kalkspatplatte II (Tab. VII p. 42 und Tab. VIII p. 43) sieht man, daß der Einfluß der Frequenz auf den Widerstand $w_1\infty$ mit Abnahme der Temperatur, also auch der Leitfähigkeit geringer wird: bei 149,4° entspricht einer Abnahme der Schwingungszahl um die Hälfte, eine Abnahme des Widerstandes $w_1\infty$ um 5 Proz.; bei 139,3° dagegen eine Abnahme um 3 Proz. Es ist nun möglich, daß mit weiter wachsendem Widerstand sich der Sinn des Einflusses der Frequenz auf $w_1\infty$ ändert, dies wird auch durch die Formel

$$\frac{w_1\infty}{w_1} = \left(1+\frac{c_1}{C}\right)^2 \frac{\left(1+\dfrac{\operatorname{tg}\vartheta}{n\,C w_1\left(1+\dfrac{c_1}{C}\right)}\right)^2}{1+\dfrac{\operatorname{tg}\vartheta}{n\,C w_1}\left(1+n^2 c_1{}^2 w_1{}^2\right)}$$

bestätigt: je größer der Widerstand, desto mehr kann der Einfluß des Nenners

$$1+\frac{\operatorname{tg}\vartheta}{n\,C w_1}\left(1+n^2 c_1{}^2 w_1{}^2\right)$$

denjenigen des Faktors

$$\left(1+\frac{c_1}{C}\right)^2$$

im Zähler überwiegen; der Nenner aber bedingt eine Zunahme von $w_1\infty$ mit abnehmender Frequenz.

Jedenfalls ist bei gleich großer Leitfähigkeit der bestrahlten Platte derselbe Sinn des Einflusses der Schwingungszahl auf $w_1\infty$ vorhanden, wie bei der unbestrahlten Platte.

Die Versuche über die Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Temperatur zusammen mit den Bestrahlungsversuchen

bilden eine weitere Bestätigung des elektrolytischen Charakters der Elektrizitätsleitung im Kalkspat.

Die zeitliche Konstanz der Leitfähigkeiten bei derselben Temperatur und die Tatsache, daß dieselbe sich nach einer vorherigen Abkühlung gar nicht und nach einer Erhitzung nur sehr wenig ändert, spricht dafür, daß Kalkspat jedenfalls selbst als Ganzes leitet und nicht etwa wegen des in ihm möglicherweise eingeschlossenen Wassers, so wie es Curie für Quarz und die anderen von ihm untersuchten Kristalle annimmt.

Dies entspricht einem der von Röntgen[1]) angegebenen Ergebnisse seiner Untersuchung, nämlich der Berechtigung von einem meßbaren Leitungsvermögen einer Kalkspatplatte sprechen zu dürfen.

Auch stimmen die über den Einfluß der Temperatur auf die Leitfähigkeit von Kalkspat erhaltenen Resultate mit denjenigen von Röntgen wenigstens qualitativ überein.

Die Versuche über die Abhängigkeit von der Temperatur und der Bestrahlung lassen die Annahme zu, daß es sich in beiden Fällen um ein und dieselbe Wirkung handelt, nämlich, daß sowohl durch die Temperatur, wie durch die ionisierende Wirkung der X-Strahlen der Dissoziationsgrad der festen Lösung erhöht wird und wie es schon Joffé[2]) im Falle von Quarz bemerkte, jeder Temperatur ein ganz bestimmter Dissoziationsgrad entspricht.

Je höher die Temperatur ist, bei der nach einer Bestrahlung beobachtet wird, desto kleiner scheint die relative Zunahme der Leitfähigkeit durch die Bestrahlung zu sein.

Die höhere Temperatur beschleunigt die Wiedervereinigung der dissoziierten Ionen, deshalb klingt die durch Bestrahlung erhöhte Leitfähigkeit desto rascher ab, je höher die Temperatur ist.

Das deutliche Auftreten eines Maximums der Leitfähigkeit bei niedriger Temperatur läßt sich wahrscheinlich durch eine endliche Dissoziationsgeschwindigkeit der Ionen erklären, die denselben durch die Wirkung der X-Strahlen erteilt wird.

Die Ursache des langsamen Abklingens der durch Bestrahlung erzeugten Leitfähigkeit, sowie der auf p. 50 erwähnten

1) W. C. Röntgen, l. c.
2) A. Joffe, l. c. p. 66.

Nachwirkung, die mit einer vorhergehenden Erhöhung der Leitfähigkeit durch Erhitzung verbunden zu sein scheint, ist sehr wahrscheinlich in der großen inneren Reibung zu suchen, die den Prozeß der Wiedervereinigung der Ionen viel langsamer als in Gasen und Flüssigkeiten verlaufen läßt.

Ebenso wie durch die Temperatur das Abklingen der durch die X-Strahlen hervorgerufenen Leitfähigkeit beschleunigt wird, so tritt auch das Maximum der Leitfähigkeit desto rascher nach der Bestrahlung auf, je höher die Temperatur ist, bei der nach der Bestrahlung beobachtet wird. Ist vor der Bestrahlung schon eine größere Leitfähigkeit, als die der gegebenen Temperatur entsprechende vorhanden, so tritt das Maximum desto früher auf, die Wirkung der neuen Bestrahlung superponiert sich derjenigen der vorhergehenden und der Anfangswert nach der neuen Bestrahlung ist bei derselben Temperatur gleich demjenigen nach der vorhergehenden vergrößert um den Wert, der unmittelbar vor der neuen noch vorhanden war. Daß durch Bestrahlung mit X-Strahlen die Leitfähigkeit des Kalkspates beträchtlich erhöht wird, hat schon Röntgen[1]) gefunden und ebenfalls ein langsames Anwachsen der Leitfähigkeit nach der Bestrahlung bis zu einem Maximum beobachtet. Ebenso fand auch Röntgen, daß durch Erwärmen dieses zeitliche Anwachsen der Leitfähigkeit bis zu einem Maximum, sowie auch das darauf folgende Abklingen beschleunigt werden kann.

Daß durch die Bestrahlung nur die elektrolytische Leitfähigkeit beeinflußt wird, geht aus den beiden Versuchsergebnissen hervor, erstens, daß die Kapazität ihren der gegebenen Temperatur entsprechenden Wert auch nach der Bestrahlung nicht ändert; zweitens, daß ein gleichgerichteter Einfluß der Frequenz bei gleich großer Leitfähigkeit bestehen bleibt, was die Versuche der Tab. XVIII zeigen.

Dies würde beweisen, daß durch die Bestrahlung die dielektrischen Eigenschaften des Kalkspates nicht verändert worden sind.

---

1) W. C. Röntgen, l. c.

Zusammenfassung der Resultate.

Es wurde in vorliegender Arbeit an zwei Kalkspatplatten festgestellt, daß

1. der Kalkspat sich senkrecht zur Achse, wie ein elektrolytisch leitendes Dielektrikum verhält.

2. Der beobachtete Einfluß der Frequenz läßt die Annahme der Existenz einer galvanischen Polarisation bei Kalkspat zu, die vermutlich im Vergleich zu der bei flüssigen Elektrolyten beobachteten sehr hohe Werte erreichen kann.

3. Die Dielektrizitätskonstante von Kalkspat wächst langsam mit der Temperatur. Bei beiden untersuchten Kalkspatexemplaren haben sich für das gleiche Temperaturintervall von 20^0—110^0, die wenig voneinander verschiedenen Gesamtzunahmen von 3,5 und 3,7 Proz. ergeben.

4. Entsprechend dem Charakter einer festen Lösung ist die natürliche Leitfähigkeit des Kalkspates von Objekt zu Objekt sehr verschieden, ist aber für ein und dasselbe Objekt zeitlich konstant.

5. Die Leitfähigkeit steigt im beobachteten Temperaturintervall von 20^0—150^0 zunächst stark, dann langsamer mit der Temperatur. In einem gewissen Temperaturbereiche, der für beide Platten gleich großen Leitfähigkeiten entspricht, nähert sich das Gesetz der Abhängigkeit von der Temperatur stark an das Exponentialgesetz

$$\sigma_t = \sigma_0 \, e^{\alpha (t^0 - t_0^0)}$$

und der Temperaturkoeffizient α desselben hat für beide Platten nur um 2 Proz. voneinander abweichende Werte 0,0661 und 0,0674.

6. Eine Bestrahlung des Kalkspates mit X-Strahlen erhöht die Leitfähigkeit desselben sehr stark (bei Zimmertemperatur mindestens 170 mal) und es entspricht diese Erhöhung bei Zimmertemperatur einer Erwärmung bis über 60^0.

7. Nach der Bestrahlung steigt die Leitfähigkeit wenigstens bei niedrigen Temperaturen langsam an, um dann wieder immer langsamer abzunehmen.

8. Wenn die Wirkung einer Bestrahlung auf die Leitfähigkeit noch nicht vollständig abgeklungen ist, superponiert sich bei einer neuen Bestrahlung die Wirkung derselben.

Nach längerer Zeit klingt die gemeinschaftliche Wirkung so ab, als ob nur diejenige der vorhergehenden allein vorhanden wäre.

9. Je höher die Temperatur ist, bei der nach einer Bestrahlung beobachtet wird, desto rascher klingt die Wirkung ab. Das Maximum rückt mit wachsender Temperatur immer näher an die Zeit Null nach der Bestrahlung.

10. Die durch die X-Strahlen erzeugte Leitfähigkeit zeigt denselben Charakter wie die natürliche.

11. Die Bestrahlung mit X-Strahlen hat keinen merklichen Einfluß auf die dielektrischen Eigenschaften des Kalkspates.

München, Physikalisches Institut der Universität.
Im Juni 1912.

Tabelle 1.

Zusammenstellung der Messungen am Kalkspat I bei Zimmertemperatur.

$t'^0 \sim$ Temperatur im Zimmer. $t^0 \sim$ Temperatur im elektr. Ofen.

Datum	t'	t	n 2π	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ Ω	p_3 10^{-3}H.	p_3' 10^{-3}H.	$p_3 - p_3'$ 10^{-3}H.	c_1 10^{-3}MF.	w_1 $10^6\ \Omega$
19. XI. 10.	—	20°	258,02	—	30,73	1000	1,31	1,12	0,19	0,2052	9700
3. I. 11.	—	19°	772,4	39	—	500	1,048	1,023	0,025	0,2034	4200
10. I. 11.	20°	19°	771,2	59	—	500	0,999	0,999	0,000	0,2040	∞
12. I. 11.	—	18°	257,0	35	—	500	1,063	1,048	0,015	0,2041	63000
13. I. 11.	—	18°	257,0	51	30,57	500	1,023	1,023	0,000	0,2039	∞
24. I. 11.	—	17°	257,0	61	30,56	100/	1,002	1,000	0,002	0,2036	90000
27. I. 11.	20,5°	19°	257,1	61	30,56	100/	1,160	0,987	0,063	0,2035	3000
30. I. 11.	—	17°	257,05	61	30,54	200	0,999	0,985	0,014	0,2035	27000
31. I. 11.	—	19°	320,35	61	30,53	200	0,980	0,963	0,017	0,2035	14000
4. II. 11.	—	19°	320,5	63	30,54	200	0,986	0,992	− 0,006	0,2033	—
18. III. 11.	—	17°	129,25	63	30,46	200	1,108	1,194	− 0,086	0,2034	—
8. IV. 11.	21°	20°	129,4	75	30,42	50/	1,117	1,098	0,019	0,2032	21000[1]
15. IV. 11.	20°	19°	258,3	75	30,38	100/	1,028	1,010	0,018	0,2024	10000
18. IV. 11.	—	21°	258,33	75	30,35	100/	1,041	0,997	0,044	0,2024	4300
22. IV. 11.	20°	19°	258,33	75	30,34	100/	1,054	1,001	0,053	0,2022	3600
26. IV. 11.	21°	21°	258,33	75	30,40	100/	1,106	1,000	0,106	0,2025	1770
27. IV. 11.[2]	21°	19°	258,4	75	30,40	100/	1,045	0,998	0,047	0,2020	4000
29. IV. 11.	20°	20°	258,3	75	30,36	100/	1,098	1,000	0,098	0,2021	1920
4. V. 11.	—	21°	258,3	75	30,35	100/	1,106	1,008	0,098	0,2022	1920
17. V. 11.[3]	—	21°	258,3	75	30,35	100/	1,087	1,008	0,075	0,2022	2500
18. V. 11.	21°	20°	258,33	75	30,35	500	1,780	1,014	0,766	0,2022	1220
18. V. 11.	21°	21°	258,37	75	30,35	100//	1,129	1,044	0,085	0,2022	2210
18. V. 11.	22°	21°	258,33	75	30,35	100//	10,304	10,158	0,146	0,2022	1290
27. V. 11.	22°	21°	258,33	75	30,35	500	1,766	1,025	0,741	0,2022	1270
29. V. 11.	22°	21°	258,35	75	30,35	500	1,692	1,008	0,684	0,2022	1370
31. V. 11.	22°	22°	258,33	75	30,35	500	1,865	1,002	0,863	0,2022	1087
2. VI. 11.	22°	22°	258,3	75	30,35	1000	2,361	1,039	1,322	0,2022	1420
8. VI. 11.[4]	21°	20°	258,33	72	30,35	100	1,131	1,023	0,108	0,2021	1740
11. VI. 11.	21°	20°	258,33	72	30,35	1000	2,339	1,036	1,303	0,2022	1440

[1]) System des Vibrationsgalvanometers wurde frisch magnetisiert.

[2]) Das Innere des Ofens wurde 14 Stunden mit konzentrierter Schwefelsäure getrocknet.

[3]) Es wurde vom 4. V. bis 17. V. mit konzentrierter Schwefelsäure getrocknet.

[4]) Es wurde vom 4. VI. bis 8. VI. mit konzentrierter Schwefelsäure getrocknet.

In der Zeit vom 10. Januar bis 22. April hat die Kapazität der Kalkspatplatte von $0{,}2041 \cdot 10^{-3}$ MF. bis $0{,}2022 \cdot 10^{-3}$ MF. d. h. um 1 % abgenommen.

Tabelle 2.

Kalkspatplatte I bei 110° und $\frac{n}{2\pi} = 256 + \frac{x}{60}$ ($x \sim$ Schwebungszahl pro Minute).

Datum	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ Ω	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 w_3' - p_3' w_3$ 10^{-3} H. Ω	c_1' 10^{-8} MF.	c_1 10^{-3} MF.	w_1 10^6 Ω	$c_1 w_1$ 10^3 MF. Ω
23. I. 11.	1.	20,5°	110,1°	257,0	37	32,03	100	9,735	0,990	875,8	0,2154	0,2108	20,87	4,400
„	2.	20,5°	110,1°	257,0	61	32,01	100	9,698	0,990	872,1	0,2154	0,2109	20,94	4,418
„	3.	20,5°	110,1°	257,0	38	32,0	100	9,692	0,990	871,5	0,2154	0,2109	20,97	4,422
25. I. 11.	4.	20,8°	110,1°	257,0	61	31,98	100	9,614	0,995	863,2	0,2149	0,2104	21,22	4,468
„	5.	—	110,1°	257,1	36	31,96	100	9,592	0,995	860,9	0,2144	0,2100	21,08	4,428
„	6.	—	110,1°	257,05	36	31,96	200	17,854	0,993	3374,4	0,2143	0,2102	21,69	4,560
„	7.	—	110,1°	257,05	61	31,95	200	18,392	0,993	3482,2	0,2142	0,2098	21,03	4,413
28. I. 11.	8.	20,7°	110,1°	257,05	61	31,97	200	18,474	0,991	3499,0	0,2146	0,2097	20,97	4,395
„	9.	—	110,1°	257,1	61	31,98	100	9,560	0,991	858,1	0,2148	0,2104	21,32	4,490
„	10.	—	110,1°	257,05	61	32,23	200	27,689	9,829	3573,0	0,2167	0,2099	20,82	4,373
„	11.	—	110,1°	257,05	35	32,0	200	18,114	0,971	3431,0	0,2152	0,2109	21,28	4,490
12. III. 11.	12.	20,5°	110,1°	256,78	61	31,95	100	9,508	1,003	851,7	0,2144	0,2101	21,57	4,532
„	13.	20,5°	110,1°	256,68	32	31,99	100	9,446	1,005	845,3	0,2151	0,2109	21,67	4,571
12. u. 13. III. 11.	14.	20,6°	110,1°	256,63	62	31,88	200	18,357	1,022	3469,4	0,2136	0,2092	21,26	4,450
9. IV. 11.	15.	20,8°	110,1°	258,3 [1])	75	31,87	100	9,513	1,011	851,4	0,2138	0,2095	21,40	4,486
„	16.	20,8°	110,1°	258,3 [1])	75	32,28	100	18,816	9,995	882,6	0,2180	0,2093	21,60	4,524
9. u. 10. IV. 11.	17.	21,0°	110,1°	258,17	75	31,88	100	9,509	1,007	851,4	0,2141	0,2097	21,40	4,490
16. u. 17. IV. 11.	18.	20,8°	110,1°	258,3	75	31,95	50	5,235	0,997	212,5	0,2146	0,2099	21,50	4,512
17. IV. 11.	19.	21,0°	110,1°	258,3	75	32,40	100	18,711	9,834	888,2	0,2184	0,2096	21,34	4,473
20. V. 11.	20.	21,9°	110,1°	258,32	75	31,90	100	9,461	1,027	844,7	0,2137	0,2093	21,56	4,515

[1]) Bei den Versuchen Nr. 15 u. 16 war $\frac{n}{2\pi} = 2\left(128 + \frac{x}{60}\right)$.

Tabelle 3.

Kalkspatplatte I bei $\frac{n}{2\pi} = 2\left(384 + \frac{x}{60}\right)$ und 110°.

Datum	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ Ω	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 - p_3'$ 10^{-3} H.	c_1' 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ 10^6 Ω	$c_{1\infty}\, w_{1\infty}$ 10^3 MF. Ω
5. u. 6. I. 11.	1.	20,0°	110,2°	772,0	36	31,45	500	5,516	0,999	4,517	0,2103	0,2098	22,44	4,710
6. I. 11.	2.	19,7°	110,1°	771,6	36	31,5	500	5,621	0,999	4,622	0,2106	0,2101	21,93	4,610
7. I. 11.	3.	20,0°	110,1°	771,8	36	31,55	500	14,460	9,763	4,697	0,2118	0,2105	21,78	4,585
8. I. 11.	4.	20,0°	110,1°	771,2	36	31,6	500	14,568	9,777	4,791	0,2118	0,2104	21,41	4,505
8. I. 11.	5.	20,0°	110,1°	771,4	36	31,5	500	5,564	0,999	4,565	0,2106	0,2101	22,20	4,670
8. I. 11.	6.	20,0°	110,1°	771,4	58	31,5	500	5,682	0,999	4,683	0,2111	0,2106	21,60	4,550

Tabelle 4.

Kalkspatplatte I bei $\frac{n}{2\pi} = 320 + \frac{x}{60}$ und 110°.

Datum	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ Ω	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 w_3' - p_3' w_3$ 10^{-3} H. Ω	c'_1 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ 10^6 Ω	$c_{1\infty}\, w_{1\infty}$ 10^3 MF. Ω
31. I. 11.	1.	21,0°	110,1°	320,5	61	31,73	100/	6,292	0,985	531,5	0,2129	0,2102	22,20	4,670
31. I. 11.	2.	21,0°	110,1°	320,52	61	31,75	200	11,950	0,991	2193,2	0,2129	0,2100	21,5	4,517
31. I. 11.	3.	21,0°	110,1°	320,5	61	32,06	200	21,118	9,853	2252,8	0,2157	0,2107	21,25	4,478
2. II. 11.	4.	20,7°	110,1°	320,5	62	31,76	100/	6,303	0,988	532,3	0,2129	0,2102	22,05	4,640
2. II. 11.	5.	21,8°	110,1°	320,5	36	31,75	200	11,948	0,976	2195,9	0,2132	0,2103	21,40	4,501
2. II. 11.	6.	21,8°	110,1°	320,5	62	31,79	200	11,920	0,990	2187,4	0,2129	0,2100	21,53	4,524

Tabelle 5.

Kalkspatplatte I bei $\frac{n}{2\pi} = 128 + \frac{x}{60}$ und 110°.

Datum	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ Ω Δw_3 $\Delta w_3'$	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 w_3' - p_3' w_3$ 10^{-3} H. Ω	c_1' 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ 10^6 Ω	$c_{1\infty} w_{1\infty}$ 10^3 MF. Ω
24. III. 11.	1.	21,0°	110,1°	129,45	63	33,43	25 0,11 0,14	9,791	1,012	220,73	0,2250	0,2068	21,13	4,373
25. III. 11.	2.	20,7°	110,1°	129,35	74	33,42	25 0,11 0,14	9,873	1,015	222,7	0,2243	0,2059	21,04	4,335
26. III. 11.	3.	20,9°	110,1°	129,4	37	33,81	25 0,11 0,14	9,735	1,014	219,29	0,2277	0,2096	21,00	4,402
3. IV. 11.	4.	21,9°	110,1°	129,4	64	36,12	25 0,24 0,13	21,937	10,641	282,7	0,2473	0,2043	20,68	4,228
5. IV. 11.	5.	20,4°	110,1°	129,4	64	36,18	25 0,19 0,10	21,933	10,658	282,0	0,2483	0,2058	20,56	4,230
5. IV. 11.	6.	20,4°	110,1°	129,35	75	36,12	25 0,19 0,10	21,752	10,628	278,3	0,2470	0,2049	20,82	4,269

Tabelle 6.

Kalkspatplatte I bei $\frac{n}{2\pi} = 256 + \frac{x}{60}$ und 115°.

Datum	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ $\Delta w_3\ \Omega\ \Delta w'_3$	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 w_3' - p'_3 w_3$ 10^{-3} H. Ω	c_1' 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ 10^6 Ω
20. IV. 11.	1.	21,7°	115,0°	258,3	75	32,42	100 0,23 0,14	12,675	1,000	1169,1	0,2183	0,2100	15,56
20. IV. 11.	2.	21,7°	115,0°	258,32	37	32,43	100 0,23 0,14	12,642	0,998	1166,0	0,2187	0,2104	15,58
21. IV. 11.	3.	20,8°	115,0°	258,32	75	32,48	50 0,10 0,14	6,763	1,017	288,1	0,2189	0,2106	15,82
21. IV. 11.	4.	20,2°	115,0°	258,33	75	33,13	100 0,19 0,10	22,238	9,850	1239,1	0,2237	0,2092	15,50
21. IV. 11.	5.	20,2°	115,0°	258,33	75	32,42	100 0,20 0,13	12,733	1,000	1174,8	0,2183	0,2099	15,48

Mittelbildung:

$w_{1\infty}$	$c_{1\infty}$
1. 15,56	1. 0,2100
1. 15,58	1. 0,2104
2. 15,82	2. 0,2106
1. 15,50	1. 0,2092
1. 15,48	1. 0,2099
15,63 ± 0,06	0,2101

Mittelwerte: $c_{1\infty} = 0{,}2101 . 10^{-3}$ MF.
$w_{1\infty} = 15{,}63 \pm 0{,}06$ Megohm.

Tabelle 7.

Kalkspatplatte I bei $\frac{n}{2\pi} = 256 + \frac{x}{60}$ und 105°.

Datum	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ $\Delta w_3\ \Omega\ \Delta w_3'$	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 w_3' - p_3' w_3$ 10^{-3} H. Ω	c_1' 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ $10^6\ \Omega$
24. IV. 11.	1.	21,2°	105,1°	258,37	75	31,72	200 0,22 0,12	22,661	9,875	2557,8	0,2124	0,2084	28,92
24. IV. 11.	2.	20,6°	105,1°	258,35	75	31,91	100// 0,15 0,10	16,515	9,876	664,7	0,2141	0,2083	28,62
24. IV. 11.	3.	20,8°	105,1°	258,33	75	31,50	110// 0,11 0,14	8,061	1,006	7,055 [1]	0,2106	0,2080	28,51
24. u. 25. IV. 11.	4.	21,0°	105,1°	258,33	75	31,52	200 0,22 0,14	13,611	1,015	2521,0	0,2106	0,2082	28,98
25. IV. 11.	5.	21,4°	105,1°	258,32	75	31,60	110/ 0,12 0,14	7,755	1,004	6,751 [1]	0,2115	0,2092	29,62

Mittelwerte: $c_{1\infty} = 0{,}2086 . 10^{-3}$ MF.
$w_{1\infty} = 29{,}05$ Megohm.

[1]) Bei den Versuchen Nr. 3 und 5 in Kolonne XI ist statt $p_3 w_3' - p_3' w_3$ direkt $p_3 - p_3'$ in 10^{-3} H. eingetragen.

Tabelle 8.

Kalkspatplatte I bei $\frac{n}{2\pi} = 256 + \frac{x}{60}$ und 100°.

Datum	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ Δw_3 Ω $\Delta w_3'$	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 w_3' - p_3' w_3$ 10^{-3} H. Ω	c_1' 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ 10^6 Ω
27. u. 28. IV. 11.	1.	21,4°	100,2°	258.38	75	31,40	100/ 0,10 0,14	5,299	0,997	430,8	0,2097	0,2085	42,43
28. IV. 11.	2.	20,9°	100,2°	258.33	75	31,37	200 0,12 0,14	9,774	1,001	1755,8	0,2097	0,2086	41,55
28. IV. 11.	3.	20,8°	100,2°	258.33	75	31,40	100// 0,10 0,14	5,432	1,007	443.2	0,2099	0,2087	41,20
28. u. 29. IV. 11.	4.	21,2°	100,2°	258,35	75	31,66	100// 0,22 0,12	14,432	9,853	457,4	0,2118	0,2081	41,51
29. IV. 11.	5.	21,4°	100,2°	258.33	75	31,50	200 0,16 0,12	18,746	9,865	1776.8	0,2106	0,2083	41,53

Mittelwerte: $c_{1\infty} = 0{,}2085 . 10^{-3}$ MF.;
$w_{1\infty} = 41{,}78 \pm 0{,}21$ Megohm.

Tabelle 9.

Kalkspatplatte I bei $\frac{n}{2\pi} = 256 + \frac{x}{60}$ und 90°.

Datum	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ Δw_3 Ω $\Delta w_3'$	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 w_3' - p_3' w_3$ 10^{-3} H. Ω	c_1' 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ 10^6 Ω
30. IV. 11.	1.	21,1°	89,6°	258,37	75	31,24	200 0,22 0,12	14,147	10,073	814,2	0,2092	0,2083	90,5
30. IV. 11.	2.	21,4°	89,6°	258,33	75	31,15	200 0,10 0,14	5,172	1,009	833,4	0,2086	0,2083	87,6
30. IV. u. 1. V. 11.	3.	21,0°	89,6°	258,32	75	31,15	100// 0,10 0,14	3,178	1,000	218,1	0,2086	0,2083	83,8
1. u. 2. V. 11.	4.	21,0°	89,6°	258,32	75	31,11	500 0,22 0,14	12,049	1,011	5520,5	0,2082	0,2079	82,7

Mittelwerte $c_{1\infty} = 0{,}2082 . 10^{-3}$ MF.;
$w_{1\infty} = 86{,}2 \pm 1{,}8 . 10^6$ Megohm.

Tabelle 10.

Kalkspatplatte I bei $\frac{n}{2\pi} = 256 + \frac{x}{60}$ und 80°.

Datum	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ Δw_3 Ω $\Delta w_3'$	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 w_3' - p_3' w_3$ 10^{-3} H. Ω	c_1' 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}'$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ 10^6 Ω
2. u. 3. V. 11.	1.	21,0°	79,7°	258,33	75	30,96	500 0,10 0,14	6,201	0,997	5,204[1])	0,2071	0,2070	176,1
3. V. 11.	2.	21,1°	79,7°	258,4	75	30,96	200 0,10 0,14	3,062	0,993	414,1	0,2070	0,2070	177,3
20. u. 21. V. 11.	3.	21,8°	79,7°	258,33	75	30,96	100// 0,10 0,15	2,105	1,014	109,3	0,2068	0,2068	168,3
25. V. 11.	4.	21,8°	79,7°	258,37	75	30,96	200 0,10 0,14	3,078	1,022	411,5	0,2070	0,2069	178,4
25. V. 11.	5.	22,0°	79,7°	258,35	75	31,00	200 0,24 0,14	12,331	10,173	431,0	0,2076	0,2071	171,8
26. V. 11.	6.	21,8°	79,7°	258,38	75	30,96	500 0,23 0,11	15,415	10,161	2627,5	0,2070	0,2068	174,9

Mittelwerte: $c_{1\infty} = \mathbf{0{,}2069 . 10^{-3}}$ MF.; $w_{1\infty} = \mathbf{174{,}5 \pm 1{,}4}$ Megohm.

[1]) Vgl. Anmerkung p. 80.

Tabelle 11.

Kalkspatplatte I bei $\frac{n}{2\pi} = 256 + \frac{x}{60}$ und 70°.

Datum	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	E_{eff} Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ $\Delta w_3\ \Omega\ \Delta w_3'$	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 w_3' - p_3' w_3$ 10^{-3} H. Ω	c_1' 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ $10^6\ \Omega$
27. V. 11.	1.	21,8°	69,7°	258.37	75	30.85	1000	15,789	9,923	5,866[1])	0,2059	0,2059	314
27. V. 11.	2.	21,4°	69,7°	258,33	75	30,85	500	12,818	9,946	2,872[1])	0,2061	0,2060	321
28. V. 11.	3.	21,6°	69,7°	258,35	75	30.85	400 0,10 0,14	3,227	1,017	884.4	0,2059	0,2059	334
28. V. 11.	4.	21,6°	69,7°	258,35	75	30,85	200 0,10 0,14	2,154	0,985	234.0	0,2058	0,2058	315
28. V. 11.	5.	21,5°	69,7°	258,33	75	30,85	900	5,992	1,004	4,988[1])	0,2059	0,2059	333

Mittelwerte: $c_{1\infty} = 0{,}2059 . 10^{-3}$ MF.; $w_{1\infty} = 323 \pm 4$ Megohm.

[1]) $p_3 - p_3'$ statt $p_3 w_3' - p_3' w_3$.

Tabelle 12.

Kalkspatplatte I bei $\frac{n}{2\pi} = 256 + \frac{x}{60}$ und 60°.

Datum	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_1$ Ω	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 - p_3'$ 10^{-3} H.	c_1' 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ 10^6 Ω
29. V. 11.	1.	21,6°	59,9°	258,33	75	30,75	1000	12,943	10,005	2,938	0,2052	0,2052	629
30. V. 11.	2.	22,0°	59,9°	258,33	75	30,75	400 0,14 0,14	10,965	9,972	0,993	0,2052	0,2052	746
30. V. 11.	3.	22,0°	59,9°	258,33	75	30,75	800	3,402	1,014	2,388	0,2052	0,2052	619
30. V. 11.	4.	22,0°	59,9°	258,33	75	30,75	400 0,11 0,15	2,296	1,014	1,282	0,2052	0,2052	577
30. V. 11.	5.	22,0°	59,9°	258,33	75	30,75	100 0,15 0,15	1,305	1,003	0,302	0,2052	0,2052	613
30. V. 11.	6.	22,0°	59,9°	258,33	75	30,75	400 0,14 0,14	11,025	9,972	1,053	0,2052	0,2052	703

Mittelwerte: $c_{1\infty} = 0{,}2052 \cdot 10^{-3}$ MF.; $w_{1\infty} = 648 \pm 26$ Megohm.

Tabelle 13.

Kalkspatplatte I bei $\frac{n}{2\pi} = 256 + \frac{x}{60}$ und 50°.

Datum	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ Ω	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 - p_3'$ 10^{-3} H.	c_1' 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ 10^6 Ω
1. VI. 11.	1.	22,1°	50,0°	258,3	75	30,65	100//	1,192	1,022	0,170	0,2043	0,2043	1094
1. VI. 11.	2.	22,2°	50,0°	258,32	75	30,64	1000	3,038	1,052	1,986	0,2043	0,2043	934
1. VI. 11.	3.	22,0°	50,0°	258,3	75	30,64	500	2,232	1,047	1,185	0,2044	0,2044	783
1. VI. 11.	4.	21,9°	50,0°	258,3	75	30,65	200	1,429	1,026	0,403	0,2043	0,2043	921
1. VI. 11.	5.	21,8°	50,0°	258,3	75	30,65	1000	12,430	10,028	2,402	0,2045	0,2045	772

Mittelwerte: $c_\infty = 0{,}2044 . 10^{-3}$ MF.; $w_{1\infty} = 901 \pm 60$.

Tabelle 14.

Kalkspatplatte I bei $\frac{n}{2\pi} = 256 + \frac{x}{60}$ und 40°.

Datum	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ Ω	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 - p_3'$ 10^{-3} H.	c_1' 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ 10^6 Ω
2. VI. 11.	1.	21,7°	40,0°	258,3	72	30,57	100//	1,156	1,003	0,153	0,2034	0,2034	1222
2. u. 3. VI. 11.	2.	21,6°	40,0°	258,3	72	30,53	1000	2,864	1,041	1,823	0,2034	0,2034	1024
3. VI. 11.	3.	22,0°	40,0°	258,3	72	30,54	500	2,129	1,046	1,083	0,2034	0,2034	861
3. VI. 11.	4.	21,9°	40,0°	258,3	72	30,54	200	1,355	1,002	0,353	0,2034	0,2034	1057

Mittelwerte: $c_{1\infty} = 0{,}2034 . 10^{-3}$ MF.; $w_{1\infty} = 1041 \pm 57$ Megohm.

Tabelle 15.

Kalkspatplatte II bei $\frac{n}{2\pi} = 256 + \frac{x}{60}$ und Zimmertemperatur.

Datum	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ Ω	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 - p_3'$ 10^{-3} H.	c_1' 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ 10^6 Ω
22. X. 11.	1.	21°	20°	257,7	72	25,66	100//	1,010	1,004	0,006	0,1648	0,1648	38000
„	2.	20°	20°	257,7	72	25,65	500	1,006	1,004	0,002	0,1647	0,1647	600000
„	3.	20°	20°	257,8	71	25,65	200	1,007	1,001	0,006	0,1645	0,1645	80000
24. X. 11.	4.	20°	20°	257,1	71	25,6	100//	1,001	1,002	−0,001	0,1644	0,1644	—
25. X. 11.	5.	20°	19°	257,1	72	25,63	100//	1,006	1,001	0,005	0,1650	0,1650	50000
27. X. 11.	6.	20°	19°	257,1	72	25,61	100//	1,001	1,004	−0,003	0,1645	0,1645	—
30. X. 11.	7.	20°	19°	257,1	72	25,6	100//	0,994	0,997	−0,003	0,1645	0,1645	
31. X. 11.	8.	20°	19°	257,2	72	25,6	100//	1,011	1,004	0,007	0,1647	0,1647	33000
1. XI. 11.	9.	20°	19°	257,2	72	25,6	100//	0,999	1,011	−0,012	0,1647	0,1647	
3. XI. 11.	10.	20°	19°	257,2	71	25,6	100//	1,000	1,010	0,010	0,1647	0,1647	—
6. XI. 11.	11.	20°	20°	257,2	71	25,61	100//	1,003	1,008	−0,005	0,1645	0,1645	—
8. XI. 11.	12.	20°	20°	257,3	72	25,6	100//	1,010	1,008	0,002	0,1645	0,1645	120000
9. XI. 11.	13.	20°	19°	257,2	72	25,6	100//	1,003	1,004	−0,001	0,1645	0,1645	—
1. XII. 11.	14.	20°	18°	257,4	72	25,6	200	1,008	1,007	0,001	0,1645	0,1645	500000

Tabelle 16.

Kalkspatplatte II bei $\frac{n}{2\pi} = 256 + \frac{x}{60}$ und 50°.

Datum	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ Ω	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 - p_3'$ 10^{-3} H.	c_1' 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ 10^6 Ω
23. X. 11.	1.	20,6°	50,0°	256,97	71	25,83	100//	1,056	1,000	0,056	0,1666	0,1666	4140
23. X. 11.	2.	20,6°	50,0°	257,0	72	25,83	500	1,119	1,006	0,103	0,1667	0,1667	11150
23. X. 11.	3.	20,6°	50,0°	257,0	72	25,82	200	1,085	1,008	0,077	0,1666	0,1666	5940
											Mittel:	0,1666	7100 ± 2000

Tabelle 17.

Kalkspatplatte II bei $\frac{n}{2\pi} = 256 + \frac{x}{60}$ und 60°.

Datum	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ Ω	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 - p_3'$ 10^{-3} H.	c_1' 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ 10^6 Ω
24. X. 11.	1.	20,0°	59,9°	257,05	71	25,9	100//	1,085	1,003	0,082	0,1673	0,1673	2790
24. X. 11.	2.	20,0°	59,9°	257,03	72	25,9	500	1,198	1,006	0,192	0,1673	0,1673	5970
24. X. 11.	3.	20,0°	59,9°	257,1	72	25,9	200	1,140	1,004	0,136	0,1674	0,1674	3370
											Mittel:	0,1673	4040 ± 400

Tabelle 18.

Kalkspatplatte II bei $\frac{n}{2\pi} = 256 + \frac{x}{60}$ und 70°.

Datum	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ Ω	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 - p_3'$ 10^{-3} H.	c_1' 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ 10^6 Ω
26. X. 11.	1.	20,0°	69,7°	257,1	72	25,96	100//	1,126	1,005	0,121	0,1677	0,1677	1890
26. X. 11.	2.	20,0°	69,7°	257,1	72	25,95	200	1,175	1,001	0,174	0,1676	0,1676	2630
											Mittel:	0,1677	2260

Tabelle 19.

Kalkspatplatte II bei $\frac{n}{2\pi} = 256 + \frac{x}{60}$ und 80°.

Datum	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ Ω	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 - p_3'$ 10^{-3} H.	c_1' 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ 10^6 Ω
27. X. 11.	1.	20,0°	79,7°	257,1	72	26,0	200	1,222	0,998	0,224	0,1681	0,1681	2040
27. X. 11.	2.	20,0°	79,7°	257,1	72	26,0	100//	1,138	0,997	0,141	0,1681	0,1681	1620
											Mittel:	0,1681	1830

Tabelle 20.

Kalkspatplatte II bei $\frac{n}{2\pi} = 256 + \frac{x}{60}$ und 90°.

Datum	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ Ω	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 - p_3'$ 10^{-3} H.	c_1' 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ 10^6 Ω
30. X. 11.	1.	20,0°	89,6°	257,2	72	26,1	200	1,304	1,007	0,297	0,1689	0,1689	1530
30. X. 11.	2.	20,0°	89,6°	257,2	72	26,1	100//	1,187	1,009	0,178	0,1689	0,1689	1270
											Mittel:	0,1689	1400
													+ 130

Tabelle 21.

Kalkspatplatte II bei $\frac{n}{2\pi} = 256 + \frac{x}{60}$ und 100°.

Datum	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ Ω	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 - p_3'$ 10^{-3} H.	c_1' 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ 10^{-3} Ω
						Versuchsreihe A.							
31. X. 11.	1.	20,1°	100,2°	257.2	71	26.2	200	1.4610	1.0075	0.4535	0.1693	0.1693	997
31. X. 11.	2.	20,1°	100,2°	257.2	70	26.2	400	1.9697	1.0078	0.9619	0.1693	0.1693	940
31. X. 11.	3.	20,1°	100,2°	257.2	71	26,2	100/	1.2899	0,9992	0.2907	0.1696	0.1696	776
						Versuchsreihe B.							
30. XI. 11.	4.	20,8°	100,2°	257.33	70	26.2	100/	1.2522	1.0099	0.2423	0.1688	0.1688	934
30. XI. 11.	5.	20,4°	100,2°	257.33	70	26.2	400	2.0539	1.0078	1.0461	0.1693	0.1693	864
30. XI. 11.	6.	20,1°	100,2°	257.33	70	26.2	200	1.4337	1.0075	0.4262	0.1693	0.1693	1060

Mittelwerte für Versuchsreihe A:

2,997 = 1994
2,940 = 1880
1,776 = 776

Mittel $= \frac{4650}{5} = 930$

$c_{1\infty} = 0{,}1693 \cdot 10^{-3}$ MF.

$w_{1\infty} = 930$ Megohm.

Mittelwerte für Versuchsreihe B:

$c_{1\infty} = 0{,}1691 \cdot 10^{-3}$ MF.

$w_{1\infty} = 953$ Megohm.

Tabelle 22.

Kalkspatplatte II bei $\frac{n}{2\pi} = 256 + \frac{x}{60}$ und 110°.

Datum	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ Ω	p_3 10^{-3} H.	p'_3 10^{-3} H.	$p_3 - p'_3$ 10^{-3} H.	c'_1 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ 10^6 Ω
							Versuchsreihe A.						
1. XI. 11.	1.	20,1°	110,1°	257,2	70	26,28	400	2,8003	1,0050	1,795	0,1703	0,1703	501
1. XI. 11.	2.	20,0°	110,1°	257,2	70	26,3	250	2,1713	1,0013	1,170	0,1704	0,1704	480
1. XI. 11.	3.	20,0°	110,1°	257,2	71	26,29	100/$_1$	1,4510	1,0108	0,440	0,1703	0,1703	510
							Versuchsreihe B.						
26. XI. 11.	4.	20,2°	110,1°	257,4	70	26,25	100/$_1$	1,4732	1,0029	0,470	0,1693	0,1693	481
26. XI. 11.	5.	20,3°	110,1°	257,4	70	26,25	250	2,1714	1,0047	1,167	0,1693	0,1693	484
26. XI. 11.	6.	20,4°	110,1°	257,4	70	26,25	400	2,867	1,004	1,863	0,1693	0,1693	485

Mittelwerte für Versuchsreihe A:

$c_{1\infty} = 0{,}1703 \cdot 10^{-3}$ MF.

$w_{1\infty} = 497$ Megohm.

Mittelwerte für Versuchsreihe B:

$c_{1\infty} = 0{,}1693 \cdot 10^{-3}$ MF.

$w_{1\infty} = 483$ Megohm.

Tabelle 23.

Kalkspatplatte II bei $\frac{n}{2\pi} = 256 + \frac{x}{60}$ und 120°.

Datum	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ Ω	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 - p_3'$ 10^{-3} H.	c_1' 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ 10^6 Ω
							Versuchsreihe A.						
3. XI. 11.	1.	20,3°	119,9°	257,2	70	26,39	200	2,751	1,007	1.744	0,1709	0,1709	257
3. XI. 11.	2.	20,2°	119,9°	257,2	70	26,39	400	4.439	1,003	3,436	0,1709	0,1709	261
3. XI. 11.	3.	20,2°	119,9°	257,2	70	26,4	100′	1,904	1,006	0,898	0,1709	0,1709	249
							Versuchsreihe B.						
25. XI. 11.	4.	20,5°	119,9°	257,33	70	26,37	100′	1,898	1,001	0,897	0,1703	0,1703	250
25. XI. 11.	5.	20,5°	119,9°	257,33	70	26,35	200	2,848	1,001	1,847	0,1704	0,1704	243
25. XI. 11.	6.	20,6°	119,9°	257,33	70	26,35	400	4,697	1,002	3,695	0,1705	0,1705	243

Mittelwerte für Versuchsreihe A:

$c_{1\infty} = 0{,}1709 \cdot 10^{-3}$ MF.

$w_{1\infty} = 256$ Megohm.

Mittelwerte für Versuchsreihe B:

$c_{1\infty} = 0{,}1704$.

$w_{1\infty} = 247$ Megohm.

Tabelle 24.

Kalkspatplatte II bei $\frac{n}{2\pi} = 256 + \frac{x}{60}$ und 129°.

Datum	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ Ω	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 - p_3'$ 10^{-3} H.	c_1' 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ 10^6 Ω
					Versuchsreihe A.								
7. XI. 11.	1.	21,0°	129,2°	257,2	70	26,5	200	4,284	1,006	3,278	0,1717	0,1715	136
7. XI. 11.	2.	21,0°	129,2°	257,2	70	26,5	300	5,652	1,008	4,644	0,1717	0,1715	144
7. XI. 11.	3.	21,0°	129,2°	257,2	70	26,5	100//	2,692	1,009	1,683	0,1717	0,1715	133
					Versuchsreihe B.								
29. XI. 11.	4.	21,0°	129,6°	257,33	70	26,45	100/	2,624	1,012	1,612	0,1709	0,1707	139
29. XI. 11.	5.	21,0°	129,6°	257,33	70	26,45	150	3,373	1,005	2,368	0,1710	0,1708	142
29. XI. 11.	6.	21,0°	129,6°	257,33	70	26,45	200	4,375	1,001	3,374	0,1711	0,1709	133

Mittelwerte für Versuchsreihe A:

$c_{1\infty} = 0{,}1715 \cdot 10^{-3}$ MF.

$w_{1\infty} = 138$ Megohm.

Mittelwerte für Versuchsreihe B:

$c_{1\infty} = 0{,}1708 \cdot 10^{-3}$ MF.

$w_{1\infty} = 138$ Megohm.

Tabelle 25.

Kalkspatplatte II bei $\frac{n}{2\pi} = 256 + \frac{x}{60}$ und 139°.

Datum	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Sk.-T.	$w_3 = w_4$ Ω	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 - p_3'$ 10^{-3} H.	c_1' 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ 10^6 Ω
					Versuchsreihe A.								
8. XI. 11.	1.	20,2°	139,1°	257,25	70	26,59	200	6,566	1,006	5,560	0,1723	0,1719	80,0
8. XI. 11.	2.	20,1°	139,1°	257,25	70	26,6	150	5,280	1,002	4,278	0,1723	0,1719	78,1
8. XI. 11.	3.	20,1°	139,1°	257,25	70	26,6	300	9,456	1,006	8,450	0,1725	0,1721	78,9
					Versuchsreihe B.								
26. XI. 11.	4.	20,8°	139,5°	257,4	70	26,61	80/	3,310	1,003	2,307	0,1723	0,1718	77,6
26. XI. 11.	5.	20,8°	139,5°	257,4	70	26,6	150	5,370	1,002	4,368	0,1723	0,1718	76,5
26. XI. 11.	6.	20,9°	139,5°	257,4	70	26.6	200	6,641	1,006	5,635	0,1723	0,1719	78,9

Mittelwerte für Versuchsreihe A:

$c_{1\infty} = 0{,}1720 \cdot 10^{-3}$ MF.

$w_{1\infty} = 79{,}0 \pm 0{,}6$ Megohm.

Mittelwerte für Versuchsreihe B:

$c_{1\infty} = 0{,}1718 \cdot 10^{-3}$ MF.

$w_{1\infty} = 77{,}7 \pm 0{,}7$ Megohm.

Tabelle 26a.

Kalkspatplatte II bei $\frac{n}{2\pi} = 256 + \frac{x}{60}$ und 149°.

Datum	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ Ω	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 - p_3'$ 10^{-3} H.	c_1' 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ $10^6 \Omega$
						Versuchsreihe A.							
9. XI. 11.	1.	20,7°	149,4°	257,25	72	26,8	200	10,951	1,003	9,948	0,1735	0,1723	44,7
9. XI. 11.	2.	20,7°	149,4°	257,3	72	26,8	150	8,483	0,999	7,484	0,1735	0,1723	44,6
10. XI. 11.	3.	21,0°	149,4°	257,2	72	26,8	150	8,496	0,999	7,497	0,1735	0,1723	44,5
10. XI. 11.	4.	21,0°	149,4°	257,25	72	26,77	280	15,142	1,011	14,131	0,1735	0,1723	44,1
12. XI. 11.	5.	21,0°	149,4°	257,3	72	26,78	280	15,127	1,011	14,116	0,1735	0,1723	44,1
12. XI. 11.	6.	21,0°	149,4°	257,3	72	26,8	100//	6,005	1,001	5,004	0,1735	0,1722	44,5
12. XI. 11.	7.	21,0°	149,4°	257,25	31	26,82	100//	5,921	1,001	4,920	0,1735	0,1722	45,2
12. XI. 11.	8.	20,8°	149,4°	257,2	31	26,86	50//	3,475	1,005	2,470	0,1739	0,1724	45,1
12. XI. 11.	9.	20,8°	149,4°	257,3	72	26,9	50//	3,503	1,005	2,498	0,1741	0,1725	44,6

Die Berechnung der Mittelwerte siehe umseitig!

Tabelle 26a. (Fortsetzung.)

Mittelbildung für die Versuchsreihe A.

Kalkspatplatte II bei $\frac{n}{2\pi} = 257{,}3$ und $t^0 = 149^0$; $E_{\text{eff.}} = 72$ Volt.

Versuch Nr.	$w_3 = w_4$ Ω	Fehlerfaktor	Gewicht	Gewicht $x\, w_{1\infty}$
1.	200/	$200.\gamma$ [1])	$^1/_2 \sim 3$	$3.44{,}7 = 134{,}1$
2.	150/	$150.\gamma$	$^2/_3 \sim 4$	$4.44{,}6 = 178{,}4$
3.	150/	$150.\gamma$	$^2/_3 \sim 4$	$4.44{,}5 = 178{,}0$
4.	280/	$280.\gamma$	$^1/_3 \sim 2$	$2.44{,}1 = 88{,}2$
5.	280/	$280.\gamma$	$^1/_3 \sim 2$	$2.44{,}1 = 88{,}2$
6.	100//	$2.100.\gamma$	$^1/_2 \sim 3$	$3.44{,}5 = 133{,}5$
9.	50//	$2.50.\gamma$	$1 \sim 6$	$6.44{,}6 = 267{,}6$
			24	Mittel $= \frac{1068{,}0}{24} = 44{,}50$

Es sind also die Mittelwerte: $c_{1\infty} = 0{,}1723.10^{-3}$ MF.

$w_{1\infty} = 44{,}50$ Megohm.

[1]) Die systematischen Fehler, durch Ladungsströme im Brückenzweige verursacht, werden proportional gesetzt der Größe $w_3\,\gamma$ bei Reihenschaltung / und $2\,w_3\,\gamma$ bei Parallelstellung // des Vibrationsgalvanometers, wo γ die Kapazität desselben bei Reihenschaltung bedeutet.

Tabelle 26 b.

Kalkspatplatte II bei $\frac{n}{2\pi} = 256 + \frac{x}{60}$ und 149°.

Datum	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ Ω	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 - p_3'$ 10^{-3} H.	c'_1 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ 10^6 Ω
							Versuchsreihe B.						
24. XI. 11.	1.	21,4°	149,4°	257,35	72	26,75	100/	5,894	1,005	4,889	0,1733	0,1720	45,6
24. XI. 11.	2.	21,3°	149,4°	257.33	72	26,77	100//	6,013	1,001	5,012	0,1734	0,1721	44,4
24. XI. 11.	3.	21,0°	149,4°	257.33	72	26,8	50//	3,473	1,003	2,470	0,1736	0,1721	45,2
24. XI. 11.	4.	21,0°	149,4°	257,3	72	26,82	50/	3,467	1,005	2,462	0,1735	0,1720	45,4
24. XI. 11.	5.	21,1°	149,4°	257,3	72	26,9	150/	17,262	9,860	7,402	0,1741	0,1716	46,1

Mittelbildung:

6 . 45,6 = 273,6
3 . 44,4 = 133,2
6 . 45,2 = 271,2
12 . 45,4 = 544,8
4 . 46,1 = 184,4

31 . Mittel $= \frac{1407,2}{31} = 45,4$

Mittelwerte:

$c_{1\infty} = 0{,}1720 \cdot 10^{-3}$ MF.
$w_{1\infty} = 45{,}4$ Megohm.

Tabelle 27.

Kalkspatplatte II bei $\frac{n}{2\pi} = 128 - \frac{x}{60}$ und 149°.

Datum	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ Ω [1])	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 w_3' - p_3' w_3$ 10^{-3} H. Ω	c_1' 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ 10^6 Ω
16. XI. II.	1.	21,2°	149,4°	126,8	72	27,33	25/ 0,027 −0,026	6,370	1,004	133,9	0,1782	0,1719	43,1
16. XI. II.	2.	21,2°	149,4°	126,85	72	27,41	20/ 0,027 −0,026	5,356	1,007	86,83	0,1787	0,1719	42,6
16. XI. II.	3.	21,2°	149,4°	126,8	72	27,49	15/ 0,03 −0,03	4,245	1,010	48,36	0,1793	0,1720	43,1

Mittelbildung:
12.43,1 = 517,2
15.42,6 = 639,0
20.43,1 = 862,0

47. Mittel $= \frac{2018,2}{47} = 42,94$

Mittelwerte:
$c_{1\infty} = 0,1719.10^{-3}$ MF.
$w_{1\infty} = 42,94$ Megohm.

Tabelle 28.

Kalkspatplatte II bei $\frac{n}{2\pi} = 128 - \frac{x}{60}$ und 139°.

Datum	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ Ω	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 w_3' - p_3' w_3$ 10^{-3} H. Ω	c_1' 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ 10^6 Ω
17. XI. II.	1.	21,0°	139,5°	126,8	72	26,78	10/ 0,03 −0,03	5,683	0,999	187,0	0,1739	0,1718	78,6
17. XI. II.	2.	21,0°	139,5°	126,8	72	26,87	30/ 0,03 −0,03	4,706	1,004	110,9	0,1739	0,1715	74,7
17. XI. II.	3.	21,0°	139,5°	126,8	72	26,9	20/ 0,02 −0,03	3,504	1,005	49,85	0,1744	0,1715	74,0

Mittelwerte: $c_{1\infty} = 0,1716.10^{-3}$ MF. $w_{1\infty} = 75,8$ Megohm.

1) Die in Kolonne VIII links und rechts unter den Werten von $w_3 = w_4$ angegebenen Zahlen geben die Abweichungen von diesen Werten für w_3 und w_3' an.

Tabelle 29.

Kalkspatplatte II nach der I. Bestrahlung mit X-Strahlen.
(Die Platte wurde am 4. XII. 1911 von $11^h\ 10'$ bis $11^h\ 40'$ bestrahlt.)

Zeit nach der Bestrahlung	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ Ω	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 - p_3'$ 10^{-3} H.	c_1' 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$10^6\ \Omega$ $w_{1\infty}$
$1^h\ 30'$	1.	20,0°	20°	257,3	72	25,6	200	1,077	1,004	0,073	0,1645	0,1645	6320
1 Tag	2.	21,0°	21°	257,4	72	25,6	200	1,109	1,004	0,105	0,1645	0,1645	4420
1 Tag	3.	20,8°	21°	257,3	72	25,6	400	1,158	1,005	0,153	0,1645	0,1645	6080
2 Tage	4.	20,7°	21°	257,4	72	25,6	200	1,118	1,004	0,114	0,1645	0,1645	4080
2 Tage	5.	20,6°	21°	257,4	72	25,6	400	1,176	1,005	0,171	0,1645	0,1645	5470
55^h	6.	20,3°	31°	257,4	72	25,65	200	1,184	1,004	0,180	0,1650	0,1650	2570
78^h	7.	20,0°	31°	257,4	72	25,66	200	1,202	1,004	0,198	0,1650	0,1650	2340
78^h	8.	20,1°	31°	257,4	72	25,65	400	1,332	1,005	0,327	0,1650	0,1650	2850
78^h	9.	20,2°	31°	257,4	72	25,68	100	1,096	1,003	0,093	0,1652	0,1652	2490
102^h	10.	20,1°	31°	257,4	72	25,67	100	1,138	1,003	0,135	0,1650	0,1650	1720
102^h	11.	20,0°	31°	257,4	72	25,65	200	1,265	1,004	0,261	0,1650	0,1650	1770
126^h	12.	20,4°	31°	257,4	72	25,66	200	1,238[1])	1,004	0,234	0,1650	0,1650	1980
150^h	13.	20,2°	31°	257,5	72	25,68	100	1,125	1,003	0,122	0,1652	0,1652	1900
150^h	14.	20,2°	31°	257,5	72	25,67	200	1,246	1,004	0,242	0,1651	0,1651	1910
42 Tage	15.	20,5°	19°	257,5	72	25,6	200	1,039	1,004	0,035	0,1645	0,1645	13270
42 Tage	16.	20,8°	20°	257,5	72	25,6	400	1,165	1,005	0,160	0,1645	0,1645	5810
42 Tage	17.	20,9°	20°	257,5	72	25,6	100	1,029	1,003	0,026	0,1645	0,1645	8930

[1]) Diese Einstellung war sehr ungenau.

Tabelle 30.

Kalkspatplatte II nach der II. Bestrahlung.
(Platte wurde am 17. I. 12 von $11^h\,35'$ bis $12^h\,20'$ bestrahlt.)

Zeit nach der Bestrahlung	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ Ω	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 - p_3'$ 10^{-3}	c_1' 10^{-3} MF.	c_{1x} 10^{-3} MF.	w_{1x} $10^3\,\Omega$
1^h	1.	20,3°	20°	257,5	72	25,6	200	1,155	1,004	0,151	0,1645	0,1645	3080
„	2.	20,1°	20°	257,5	72	25,6	400	1,215	1,005	0,210	0,1645	0,1645	4430
„	3.	20,1°	20°	257,5	72	25,6	100	1,061	1,003	0,058	0,1645	0,1645	4000
1^h	Mittel						100			0,062		0,1645	3740
28^h	1.	20,9°	20°	257,5	72	25,6	200	1,173	1,004	0,169	0,1645	0,1645	2750
„	2.	20,9°	20°	257,5	72	25,6	400	1,235	1,005	0,230	0,1645	0,1645	4040
„	3.	21,0°	20°	257,5	72	25,6	100	1,125	1,003	0,122	0,1645	0,1645	1900
28^h	Mittel						100			0,088		0,1645	2640
52^h	1.	20,9°	20°	257,5	72	25,6	200	1,179	1,004	0,175	0,1645	0,1645	2650
„	2.	21,0°	20°	257,5	72	25,6	400	1,208	1,005	0,203	0,1645	0,1645	4580
„	3.	21,0°	20°	257,5	72	25,6	100	1,118	1,003	0,115	0,1645	0,1645	2020
52^h	Mittel						100			0,0844		0,1645	2750
79^h	1.	20,8°	20°	257,5	72	25,6	200	1,126	1,004	0,122	0,1645	0,1645	3810
„	2.	20,8°	20°	257,5	72	25,6	400	1,178	1,005	0,173	0,1645	0,1645	5360
„	3.	20,8°	20°	257,5	72	25,6	100	1,080	1,003	0,077	0,1645	0,1645	3020
79^h	Mittel						100			0,0604		0,1645	3850

Tabelle 30. (Fortsetzung.)

Kalkspatplatte II nach der II. Bestrahlung.

Zeit nach der Bestrahlung	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ Ω	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 - p_3'$ 10^{-3} H.	c_1' 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ 10^6 Ω
126h	1.	21,2°	21°	257,5	72	25,6	200	1,119	1,004	0,115	0,1645	0,1645	4040
,,	2.	21,1°	21°	257,5	72	25,6	400	1,170	1,005	0,165	0,1645	0,1645	5630
,,	3.	21,1°	21°	257,5	72	25,6	100	1,088	1,003	0,085	0,1645	0,1645	2730
126h		Mittel					100			0,0613		0,1645	3790
198h	1.	21,2°	20°	257,5	72	25,6	200	1,073	1,004	0,069	0,1645	0,1645	6730
,,	2.	21,3°	20,5°	257,5	72	25,6	400	1,123	1,005	0,118	0,1645	0,1645	7880
,,	3.	21,5°	21°	257,6	72	25,6	100	1,040	1,003	0,037	0,1645	0,1645	6270
198h		Mittel					100			0,0337		0,1645	6890
263h	1.	20,6°	20,5°	257,5	72	25,6	200	1,050	1,004	0,046	0,1645	0,1645	10100
,,	2.	20,8°	20°	257,5	72	25,6	400	1,077	1,005	0,072	0,1645	0,1645	12650
,,	3.	20,8°	20°	257,6	72	25,6	100	1,032	1,003	0,029	0,1645	0,1645	8000
263h		Mittel					100			0,023		0,1645	10100
383h	1.	21,0°	20°	257,5	72	25,6	200	1,048	1,004	0,044	0,1645	0,1645	10560
,,	2.	21,0°	20°	257,5	72	25,6	400	1,076	1,005	0,071	0,1645	0,1645	13080
,,	3.	21,1°	20°	257,5	72	25,6	100	1,032	1,003	0,029	0,1645	0,1645	8000
383h		Mittel					100			0,0229		0,1645	10130
509h	1.	20,4°	20°	257,6	72	25,6	200	1,038	1,004	0,034	0,1645	0,1645	13650
,,	2.	20,8°	20°	257,5	72	25,6	400	1,052	1,005	0,047	0,1645	0,1645	19750
,,	3.	20,8°	20°	257,6	72	25,6	100	1,023	1,003	0,020	0,1645	0,1645	11600
509h		Mittel					100			0,0163		0,1645	14250

Tabelle 31.

Kalkspatplatte II bei $\frac{n}{2\pi} = 256 + \frac{x}{60}$ nach der III. Bestrahlung.

(Platte bestrahlt am 9. II. 12 von $12^h\ 15'$ bis $1^h\ 0'$ nachmittags.)

Zeit nach der Bestrahlung	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ Ω	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 - p_3'$ 10^{-3} H. oder $p_3 w_3' - p_3' w_3$	c_1' 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ 10^6 Ω
$4^h\ 45'$	1.	21,0°	110,1°	257,6	72	26,37	200	6,310	1,003	5.307	0,1705	0,1701	84.6
$5^h\ 45'$	2.	20,9°		257,6	72	26,35	300	9,244	1,004	8.240	0,1705	0,1701	81.7
$26^h\ 50'$	3.	21,2°		257,6	72	26,37	200	5.407	1,003	4.404	0,1705	0,1702	101.8
$30^h\ 0'$	4.	20,9°		126.7	72	26.4	50/	5.455	1,005	4.450	0,1707	0,1697	104.7
$30^h\ 55'$	5.	20,8°		126.7	72	26.54	25/	3,206	1,001	54,99 [1])	0,1715	0,1699	106.1
$33^h\ 20'$	6.	20,7°		257.4	72	26.35	200	5.351	1,003	4.348	0,1705	0,1702	103.3
$34^h\ 0'$	7.	20,9°		257,4	72	26.34	100/	3,137	1,002	2.135	0,1705	0,1702	105.3
$53^h\ 30'$	8.	21,0°	110,1°	257,33	72	26.34	100/	2.919	1,002	1.917	0,1705	0,1703	112.2
$54^h\ 10'$	9.	21,0°		257,4	72	26.34	200	5.019	1,003	4.016	0,1705	0,1703	113.6
$54^h\ 45'$	10.	21.0°		257.4	72	26.33	400	8.838	1,005	7.833	0,1703	0,1701	114.8
$54^h\ 8'$	Mittel						100			1,961		0,1703	113,5
$76^h\ 50'$	11.	21,0°	110,1°	257,4	72	26,33	100/	2,719	1,002	1.717	0,1703	0,1701	131.6
$77^h\ 25'$	12.	21,0°		257,4	72	26,33	200	4.639	1,003	3.636	0,1703	0,1701	123.6
$78^h\ 0'$	13.	21,0°		257,4	72	26,3	400	8.138	1,005	7.133	0,1699	0,1697	126.5
$77^h\ 25'$	Mittel						100			1,773		0,1700	127,0
$99^h\ 15'$	14.	20.8°	110,1°	257.4	72	26.3	100	2.656	1,002	1.654	0,1699	0,1697	136.4
$100^h\ 0'$	15.	20,6°		257,4	72	26.32	200	4.354	1,003	3.351	0,1702	0,1700	134.2
$100^h\ 35'$	16.	20,6°		257,4	72	26.30	300	5,912	1,004	4.908	0,1699	0,1697	137.8
$100^h\ 0'$	Mittel						100			1,655		0,1698	136,1

Tabelle 31 (Fortsetzung).

Kalkspatplatte II nach der III. Bestrahlung.

Zeit nach der Bestrahlung	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ Ω	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 - p_3'$ 10^{-3} H.	c_1' 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ 10^6 Ω
$123^h\,55'$	17.	21,0°	110,1°	257,4	72	26,33	100	2,551	1,002	1,549	0,1703	0,1701	145,3
$124^h\,20'$	18.	21,1°		257,4	72	26,3	150	3,223	1,003	2,220	0,1699	0,1698	152,2
$125^h\,5'$	19.	20,8°		257,4	72	26,32	300	5,441	1,004	4,437	0,1702	0,1701	152,0
$124^h\,27'$		Mittel					100			1,503		0,1700	149,8
$194^h\,0'$	20.	21,2°	110,1°	257,4	72	26,34	100	2,292	1,002	1,290	0,1704	0,1703	174,0
$194^h\,35'$	21.	21,3°		257,4	72	26,34	150	3,018	1,003	2,015	0,1704	0,1703	167,1
$195^h\,15'$	22.	21,3°		257,4	72	26,33	300	4,980	1,004	3,976	0,1703	0,1702	169,6
$194^h\,37'$		Mittel					100			1,319		0,1703	170,2
$243^h\,20'$	23.	20,8°	110,1°	257,4	72	26,33	100	2,280	1,002	1,278	0,1703	0,1702	175,8
$244^h\,15'$	24.	20,9°		257,4	72	26,31	150	2,828	1,003	1,825	0,1700	0,1699	184,6
$245^h\,0'$	25.	21,0°		257,4	72	26,3	400	6,092	1,005	5,087	0,1699	0,1698	176,9
$244^h\,12'$		Mittel					100			1,255		0,1700	179,1
$311^h\,45'$	26.	20,9°	110,1°	257,4	72	26,33	100	2,170	1,002	1,168	0,1702	0,1701	192,5
$312^h\,20'$	27.	21,0°		257,4	72	26,33	200	3,299	1,003	2,296	0,1703	0,1702	195,8
$312^h\,50'$	28.	21,0°		257,4	72	26,32	400	5,858	1,005	4,853	0,1701	0,1700	185,3
$312^h\,20'$		Mittel					100			1,176		0,1701	191,2
$413^h\,15'$	29.	21,0°	110,1°	257,5	72	26,34	100	2,139	1,002	1,137	0,1704	0,1703	197,5
$414^h\,15'$	30.	21,0°		257,5	72	26,35	200	3,208	1,003	2,205	0,1705	0,1704	203,4
$414^h\,45'$	31.	21,0°		257,5	72	26,32	400	5,602	1,005	4,597	0,1701	0,1700	195,5
$414^h\,5'$		Mittel					100			1,130		0,1702	198,8

Tabelle 32.

Kalkspatplatte II nach der IV. Bestrahlung.

(Die Platte wurde am 27. II. 12. von $11^h\,7'$ bis $11^h\,52'$ vormittags bestrahlt.

Zeit nach der Bestrahlung	Versuch Nr.	t'^0	t^0	$\frac{n}{2\pi}$	$E_{\text{eff.}}$ Volt	c_2 Skt.	$w_3 = w_4$ Ω Δw_3 $\Delta w_3'$	p_3 10^{-3} H.	p_3' 10^{-3} H.	$p_3 - p_3'$ 10^{-3} H.	c_1' 10^{-3} MF.	$c_{1\infty}$ 10^{-3} MF.	$w_{1\infty}$ $10^6\,\Omega$
$3^h\,28'$	1.	21,0°	129,6°	257,5	72	26,8	60/	4,308	1,000	3,308	0,1730	0,1712	46,63
$9^h\,38'$	2.	21,0°	129,6°	257,5	72	26,74	50/	3,331	1,000	2,331	0,1729	0,1715	47,95
$23^h\,48'$	3.	21,5°	129,6°	257,5	72	26,74	50/	3,094	1,000	2,094	0,1729	0,1717	53,3
$24^h\,33'$	4.	21,8°	129,6°	257,5	72	26,65	100/	5,028	1,002	4,026	0,1727	0,1718	55,4
$28^h\,3'$	5.	22,0°	129,5°	126,5	72	26,95	25/	5,194	1,006	104,45[1]	0,1756	0,1712	55,6
							0,04 −0,04						
$28^h\,58'$	6.	22,0°	129,5°	126,4	72	27,1	20/	4,381	1,005	67,30[1]	0,1762	0,1716	55,3
							0,04 −0,04						
$32^h\,43'$	7.	22,0°	129,6°	257,4	72	26,7	50/	3,002	1,000	2,002	0,1729	0,1718	55,74
$33^h\,23'$	8.	22,0°	129,6°	257,4	72	26,63	100/	4,701	1,002	3,699	0,1727	0,1719	60,2

1) $(p_3\,w_3' - p_3'\,w_3)$ statt $(p_3 - p_3')$.

Lebenslauf.

Ich bin am 10. Juli 1884 in Warschau, Russisch-Polen, geboren, absolvierte daselbst im Juni 1901 die Staats-Realschule und bestand im Juni des folgenden Jahres die Abgangsprüfung vom Lehrkursus der Ergänzungsklasse an derselben Schule. Im Herbst 1903 bezog ich das Eidgenössische Polytechnikum zu Zürich und nachdem ich dort den ersten Jahreskursus der mechanisch-technischen Schule beendigt hatte, widmete ich mich dem Studium der Physik an der Ludwig-Maximilians-Universität zu München.